

**UNIVERZITA KARLOVA**

**Přírodovědecká fakulta**

**Ústav pro životní prostředí**

Studijní program: Ekologie a ochrana prostředí

Studijní obor: Ochrana životního prostředí



Bc. Jana Esterlová

**Dynamika distribuce částic atmosférického aerosolu  
v mezní vrstvě atmosféry**

Dynamics of vertical and horizontal profiles of atmospheric  
aerosol in planetary boundary layer

Diplomová práce

Vedoucí práce: RNDr. Jan Hovorka, PhD.

Praha, 2018

**Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracovala samostatně pod vedením RNDr. Jana Hovorky, PhD. s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použité literatury. Dále prohlašuji, že předložená tištěná verze bakalářské práce je totožná s elektronickou verzí vloženou do SIS.

V Praze dne 16. 8. 2018

.....

Jana Esterlová

### **Poděkování**

Za vytvoření této diplomové práce bych ráda poděkovala zejména svému vedoucímu RNDr. Janu Hovorkovi, PhD. za jeho trpělivost, ochotu, odborné vedení, řadu rad a připomínek a také za jeho vstřícnost a humor. Chtěla bych také poděkovat jeho doktorandům a provozovatelům vzducholodi. Děkuji také svým spolužákům za vytvoření příjemného kolektivu při studiu a zejména spolužačkám Anežce, Kátě a Štěpánce za vzájemnou podporu. Ze stejného důvodu bych chtěla poděkovat svým spolubydlícím a ostatním kamarádům. Za vytvoření vhodného zázemí ke studiu bych chtěla poděkovat své rodině a za přípravu na vysokoškolské studium také učitelskému sboru Církevního gymnázia v Plzni. Nejvíce pak děkuji Marku Janouchovi.

## Abstrakt

Mezní vrstva atmosféry je vrstvou vzduchu s šířkou přibližně do 1 km nad zemských povrchem. Povrchová těžba je jednou z aktivit, která znečišťuje vzduch v této vrstvě, jelikož generuje částice nejčastěji o velikosti aerodynamického průměru kolem 1 – 10  $\mu\text{m}$  – hrubé částice. Společnosti, které provádí těžbu v těchto dolech, za tyto emise dle zákona platí. Tyto emise však nejsou experimentálně měřeny, ale vypočítávají se na základě rovnice složené z faktorů jako je např. velikost dolu atd. Některé práce ukázaly signifikantně vyšší koncentraci frakce Coarse (hrubého aerosolu) nebo PM10 v okolí těchto dolů. Jiné práce však zjistily, že původ těchto vyšších koncentrací není v aktivitách dolu, nýbrž v aktivitách přímo v místě měření nebo v blízkosti. Neexistuje mnoho prací, které měří koncentrace částic atmosférického aerosolu přímo v ovzduší dolu. Tato práce ukazuje výsledky měření za pomoci vzducholodi ve vzdušném prostoru povrchového dolu a nad ním. Místem experimentu byl hnědouhelný důl Bílina v severních Čechách, ve významné těžební oblasti. Měření se uskutečnila v prosinci 2017. K měření hmotnostní a početní koncentrace bylo využito APS – Aerodynamic Particle Sizes Spektrometr společnosti TSI, který dělí data do kanálů podle velikostí částic. Integrační čas přístroje byl 1s a vzducholod' sbírala data se stejnou frekvencí. Meteorologické podmínky byly sledovány dvěma 3D anemometry umístěnými na dvou stranách lomu a sbírala data každou minutu. Výsledky ukazují, že hmotnostní a početní koncentrace aerosolových částic frakce Coarse se snižují se vzrůstající výškou nad povrchem země. Frakce PM10 nikoliv. Okolní obce někdy vykazují koncentrace PM10 vyšší, než je český limit ( $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ). Je možné, že emise z dolu přispívají k této koncentraci, ale v jiných případech koncentrace ve výškové hladině okolního terénu jsou v dole nižší než v obcích. Povětrnostní podmínky dolu nejsou jednotné, takže se důl nechová jako jeden velkoplošný emisní zdroj.

**Klíčová slova:** aerosol, mezní vrstva atmosféry, znečištění ovzduší



## Abstract

The boundary layer of the atmosphere is a layer of air with thickness about 1 km above the ground. Open-cast mining is one of activities that pollutes the air in this layer. It generates particulate matter (PM) mostly in size of aerodynamic diameter 1 – 10  $\mu\text{m}$  - coarse particles. The companies that do the mining pay for their emissions due to the law. However, these emissions are not experimentally measured, they are calculated from given equation consisting of factors like the size of mining area, etc. Some papers have shown significantly higher concentrations of Coarse particles (or PM<sub>10</sub>) in surroundings of the mine. Other papers have found out that the origin of these high concentrations didn't come from the mining activities but is caused due to the activities at the place of measuring or nearby. There aren't many papers that measure the PM concentrations in the air in the mining area. This thesis shows the results of airship measurements in the air layers of the open-cast mine and above them. The experimental site was brown coal mine Bílina in the North of The Czech Republic in important mining area. The measurements took place in December 2017. For measuring the number and mass concentrations was used APS – Aerodynamic Particle Sizes Spektrometr by TSI which sorts out the data into different channels of particle sizes. The integration time was 1s and the airship collected the data about its location at the same frequency. Meteorological conditions were observed with two 3D anemometers located in two sides of the mine and collected data every minute. The results show, that the mass and number concentration of aerosol particles of Coarse fractions decrease with the height above the ground. The fraction PM<sub>1</sub> doesn't. The urban areas nearby shows PM<sub>10</sub> concentrations sometimes higher than the Czech limit ( $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ). It is possible that the mine contributes to this concentration but in another cases the concentrations in the surface level in the mine are lower than the concentrations in the urban areas. The wind conditions in the mining area are not unified, so that the mine doesn't behave like one large emission source.

**Key words:** aerosol, planetary boundary layer, air pollution

# Obsah

1	Úvod .....	6
2	Mezní vrstva atmosféry .....	7
3	Atmosférický aerosol.....	8
3.1	Základní charakteristiky atmosférického aerosolu.....	9
3.1.1	Velikost a tvar částice .....	9
3.1.2	Sedimentace částic .....	11
3.1.3	Hustota částice .....	12
3.1.4	Chemické složení .....	13
3.1.5	Popisné charakteristiky atmosférického aerosolu .....	13
3.1.6	Vertikální distribuce aerosolu .....	14
3.2	Negativní vlivy .....	16
3.3	Vliv na klima .....	16
4	Povrchová těžba hnědého uhlí .....	17
4.1	Povrchový důl jakožto emisní zdroj.....	17
4.2	Složení důlního prachu.....	19
4.3	Distribuce částic v těžební jámě.....	19
4.4	Proudění v dole.....	20
5	Metodika.....	22
5.1	Místo a čas.....	22
5.2	Technologie v dole.....	24
5.3	Letová měření.....	27
5.4	Přístrojové vybavení.....	28
5.4.1	Měření koncentrace aerosolu .....	28
5.4.2	Měření teploty.....	32
5.4.3	Anemometry .....	32
5.5	Strategie letových měření.....	33
5.6	Zpracování dat.....	36

6	Výsledky.....	40
6.1	Meteorologické parametry .....	40
6.2	Experimentální charakteristika velikostní distribuce .....	43
6.3	Velikostní distribuce vertikálních letů .....	49
6.4	Koncentrace atmosférického aerosolu uvnitř těžebního prostoru ve vertikále .....	49
6.5	Koncentrace atmosférického aerosolu a jeho distribuce uvnitř těžebního prostoru v horizontále.....	51
6.6	Vertikální profil horního decilu hodnot .....	69
7	Diskuze .....	74
8	Závěr .....	83
9	Seznam použité literatury .....	84

### **Seznam použitých zkratk**

AIM – Aerosol Instrument Manager, počítačový program

APS – Aerodynamic Particle Sizer Spectrometer, čítač aerosolových částic

CMD – Count Median Diameter, velikost částice o mediánu počtu

Dp – aerodynamický průměr částice

MMD – Mass Median Diameter, velikost částice o mediánu hmotnosti

M – hmotnostní koncentrace atmosférického aerosolu

N – početní koncentrace atmosférického aerosolu

PM – Particulate Matter, aerosolové částice

PM1, PM2,5, PM10 – částice o velikosti menší než 1  $\mu\text{m}$ , resp. 2,5  $\mu\text{m}$ , resp. 10  $\mu\text{m}$

S-JTSK – systém jednotné trigonometrické sítě katastrální, vhodný typ kartografického zobrazení pro ČR

TSP – total suspended particles, celkové suspendované částice v ovzduší

UTC – světový čas

UTC+1 – středoevropský čas

# 1 Úvod

Atmosférický aerosol je přirozenou součástí zemské atmosféry. Jedná se o suspenzi pevných a kapalných částic různého chemického složení a velikosti v plynném prostředí. Aerosol je nepostradatelnou složku ovzduší, jelikož se podílí např. na vzniku srážek nebo upravuje teplotní bilanci Země. Koncentrace a složení aerosolu pak ovlivňuje vegetaci, živočichy i zdraví člověka (Braniš et al., 2011; Patra et al., 2016). Člověk sám svou činností koncentraci a složení atmosférického aerosolu ovlivňuje, a tím i děje s aerosolem spojené (Bednář in Braniš et al., 2011).

Příkladem lidské činnosti, která je významným přispěvatelem částic do ovzduší je povrchová těžba (Ghose & Majee, 2001; Pless-Mulloli et al., 2001; Gautam & Patra, 2015). Na rozdíl od hlubinné důlní těžby jsou zdravotnímu riziku z emisí vystaveni nejen pracovníci dolu ale i širší okolí, do kterého se znečištění může šířit (Ghose & Majee, 2001).

Hlavním polutantem povrchové těžby, znečišťujícím ovzduší, jsou částice (PM – particulate matter), které zvyšují koncentraci atmosférického aerosolu (Ghose & Majee 2000, 2001; Huertas et al., 2014). Množství emitovaných škodlivin pak záleží na metodách pracovních činností v dole, jejich rozsahu a koncentraci těžebních aktivit a na geomorfologii dolu (Ghose & Majee, 2001).

Mezní vrstva atmosféry představuje část troposféry v blízkosti zemského povrchu, kde se významným způsobem uplatňuje tření vzduchu o zemský povrch (Bednář in Braniš et al., 2011). Právě pro tuto vrstvu jsou koncentrace atmosférického aerosolu důležité, jelikož se jedná o vzduch, který běžně dýchají lidé a obklopuje vegetaci.

Uhlí je primárním zdrojem energie (Ghose & Majee, 2001). V České republice se v posledních pěti letech podílí na výrobě elektřiny lehce více než z 50% a na výrobě tepla více než ze 40%, přičemž tento podíl mezi lety 2010 a 2016 klesl přibližně o 10% (Severočeské Doly a.s., 2018; Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2018 a, b), celosvětově pak přibližně ze 40% (Gautam & Patra, 2015).

Povrchová těžba hnědého uhlí v České republice probíhá např. v Mostecké pánvi. Těží zde společnosti Mostecká Uhelná a Severočeské doly a.s.

Povrchová těžba je zdrojem emisí i dle zákona o ochraně ovzduší 201/2012 Sb. (změněného zákonem 369/2016 Sb.), kde je uhelný důl vyjmenován v seznamu emisních zdrojů. Na emise se vztahuje vyhláška 415/2012 Sb. Každý důl platí za své emise, kterými poškozují okolí. Šíření těchto emisí do okolí však není průběžně monitorováno, ale kvantifikace probíhá na základě výpočtu stanoveného pro každý důl.

Vyšší znečištění ovzduší částicemi v okolí povrchových dolů zaznamenal např. Pandey et al. (2014), Pless-Mullooli et al. nebo (2000), Trivedi et al. (2009). Na druhou stranu Dočekalová (2015) nebo Triantafyllou (2006) poukazují, že zvýšená úroveň znečištění v přilehlých obcích pochází z jiných než těžebních. V oblasti dolu i jeho okolí působí mnoho vlivů, které situaci ovlivňují a jedná se o velmi komplexní problematiku. Emitované částice podléhají sedimentaci a je možné, že velká část z nich je deponována již v prostoru dolu. Dnes neexistuje uspokojivý model, který by chování částic uvnitř povrchového dolu a za jeho hranicí ukazoval. Svědčí o tom i variabilita publikovaných výsledků zakládajících se na modelech. Experimentální měření ve vzdušném prostoru neexistuje prakticky žádné.

Cíli této práce je:

- Zjistit hmotnostní a početní koncentrace částic atmosférického aerosolu v povrchovém dolu a změny v jeho horizontální a vertikální distribuci
- Zjistit, zda je důl významným zdrojem částic do okolí, nebo zdrojem a současně propadem, případně propadem i jiných částic z okolí
- Vylepšit strategii leteckých měření

Hypotézy:

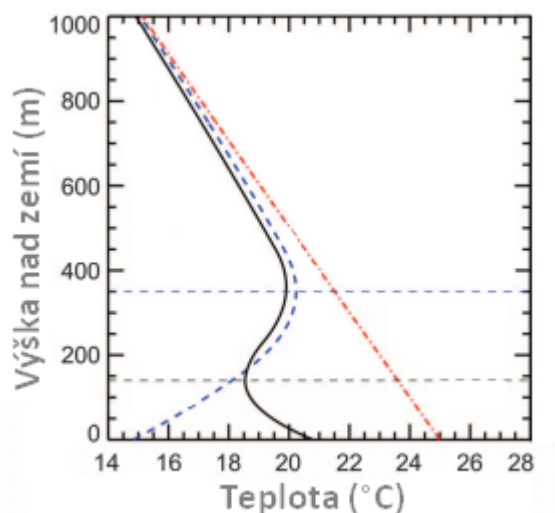
1. Koncentrace hrubých částic atmosférického aerosolu v prostoru dolu se bude s nadmořskou výškou snižovat.
2. Emise z technologií na dně lomu a v jeho nejnižších patrech při vertikálním pohybu postupně vytvoří jednotlivý emisní tok (ve výšce hrany těžební jámy); jáma odvětrává jako jeden celek.

## 2 Mezní vrstva atmosféry

Mezní vrstva atmosféry představuje vrstvu vzduchu v troposféře přibližně do 1-2 km nad zemským povrchem (Bednář in Braniš et al., 2011). Tato vrstva se oproti zbytku atmosféry (volné atmosféře) vyznačuje významným třením vzduchu o zemský povrch, a tudíž specifickým prouděním (Baron & Willeke, 2005; Bednář in Braniš et al., 2011). Tloušťka mezní vrstvy značně roste s drsností zemského povrchu, s rychlostí proudění vzduchu a s intenzitou, se kterou se vzduch vertikálně promíchává. Nejvýraznější zpomalení proudění je v bezprostřední blízkosti zemského povrchu. Vítr se oproti volné vrstvě stáčí od izobar směrem k poli nižšímu tlaku. Úhel mezi izobarami a směrem proudění pak závisí na

drsnosti povrchu a na intenzitě vertikálního promíchávání a dalších faktorech. V našich zeměpisných podmínkách tento úhel bývá 30° (Bednář, 1985).

Teplota v mezní vrstvě mnohdy neodpovídá typickému troposférickému průběhu, kdy s nadmořskou výškou klesá teplota, jelikož zde dochází k tvorbě teplotních inverzí. Obr. 1 ukazuje, jak může teplotní průběh vypadat v různých částech dne – záleží na poměru přijatého záření a záření vydaného zemí (Bednář, 1985).



Obr. 1 Průběh teploty s nadmořskou výškou v mezní vrstvě; modrá linka – při východu slunce, černá linka – ráno, červená linka – poledne (Li et al., 2014)

### 3 Atmosférický aerosol

Atmosférický aerosol je jednou ze základních tří složek atmosféry (dle Bednář in Braniš et al, 2011):

1. Suchá a čistá atmosféra – směs plynů
2. Vodní pára, vodní kapičky, ledové krystalky
3. znečišťující příměsi – zejména složky atmosférického aerosolu.

Atmosférický aerosol je někdy také označován pojmy jako polétavý prach, suspendované částice nebo PM – particulate matter. Aerosol však není jen soubor částic, jedná se o provázaný dvoufázový systém částice-vzduch. Částice mohou být kapalné, pevné nebo smíšené a jejich velikost se pohybuje přibližně mezi 1 nm – 100  $\mu$ m (Hovorka in Braniš et al., 2011), Hinds (1999) uvádí rozmezí od 2 nm a připouští možnost částic i větších než 100  $\mu$ m, Seinfeld & Pandis (2006) zobecňují průměr částice na několik nanometrů až průměry okolo 100  $\mu$ m. Obvyklá koncentrace atmosférického aerosolu se pohybuje mezi

$10^2$ - $10^8$  částic·cm<sup>-3</sup>. Dosahuje tedy velmi různých koncentrací, ve městě zpravidla vyšších (Hovorka in Braniš et al., 2011; Seinfeld & Pandis, 2006).

Aerosol je za normálních podmínek neviditelný, vzroste-li však jeho koncentrace alespoň na 1% hustoty atmosféry ( $\rho = 1,205$  kg·m<sup>-3</sup>), stává se viditelným a zahrnuje jevy jako prach, kouř, dým, mlhu, opar, mraky a smog (Hovorka in Braniš et al., 2011; Hinds, 1999).

Mezi částice tvořící aerosol se řadí: půdní a prachové částice, jemné krystalky mořských solí, vulkanický popel, kosmický prach (ale jen nepatrnou měrou), malá semena, pylová zrna a spóry, bakterie, produkty rozkladu organických látek apod. Tyto vyjmenované částice jsou přirozeného původu. Zvláštní kategorii tvoří živé organismy, které se označují jako bioaerosol. Člověk může množství těchto částic v atmosféře zvyšovat, do atmosféry ale přispívá i částicemi, které přirozenou cestou vůbec nevznikají. Jedná se o činnosti jako je těžební nebo průmyslová činnost, stavby doprava, zemědělství atd. (Bednář in Braniš et al., 2011).

Dle vzniku se aerosol dělí na primární a sekundární. Primárním aerosolem se rozumí částice v atmosféře, které do ní byly emitovány jako částice pocházející z rozpadu pevných či kapalných látek na menší složky. Sekundární aerosol se do podoby částice teprve přetvořil v ovzduší z plynných prekurzorů – tzv. gas-to-particle konverze (plyn na částici). (Hinds, 1999; Seinfeld & Pandis, 2006).

### 3.1 Základní charakteristiky atmosférického aerosolu

#### 3.1.1 Velikost a tvar částice

Velikost částice je nejdůležitějším parametrem pro charakterizování jejího chování, odvíjí se od ní prakticky všechny její vlastnosti. Velikostí částice se rozumí její průměr. Ve většině případů se však nejedná o geometrický průměr – vzdálenost mezi dvěma okraji procházející středem, ale o ekvivalentní průměr – částici je na základě fyzikálních parametrů chování přiřazen průměr kulové částice vykazující stejné chování. U aerosolu se určuje několik druhů ekvivalentních průměrů, které závisí na charakteristice, kterou zrovna sledujeme (např. difúzní, elektrické) Nejčastěji používaným a i v této práci používaným průměrem je průměr aerodynamický ( $D_p$ ), který představuje průměr kulovité částice o hustotě 1000 kg·m<sup>-3</sup> (vodní kapky), který sedimentuje stejně rychle jako příslušná částice (Hinds, 1999).

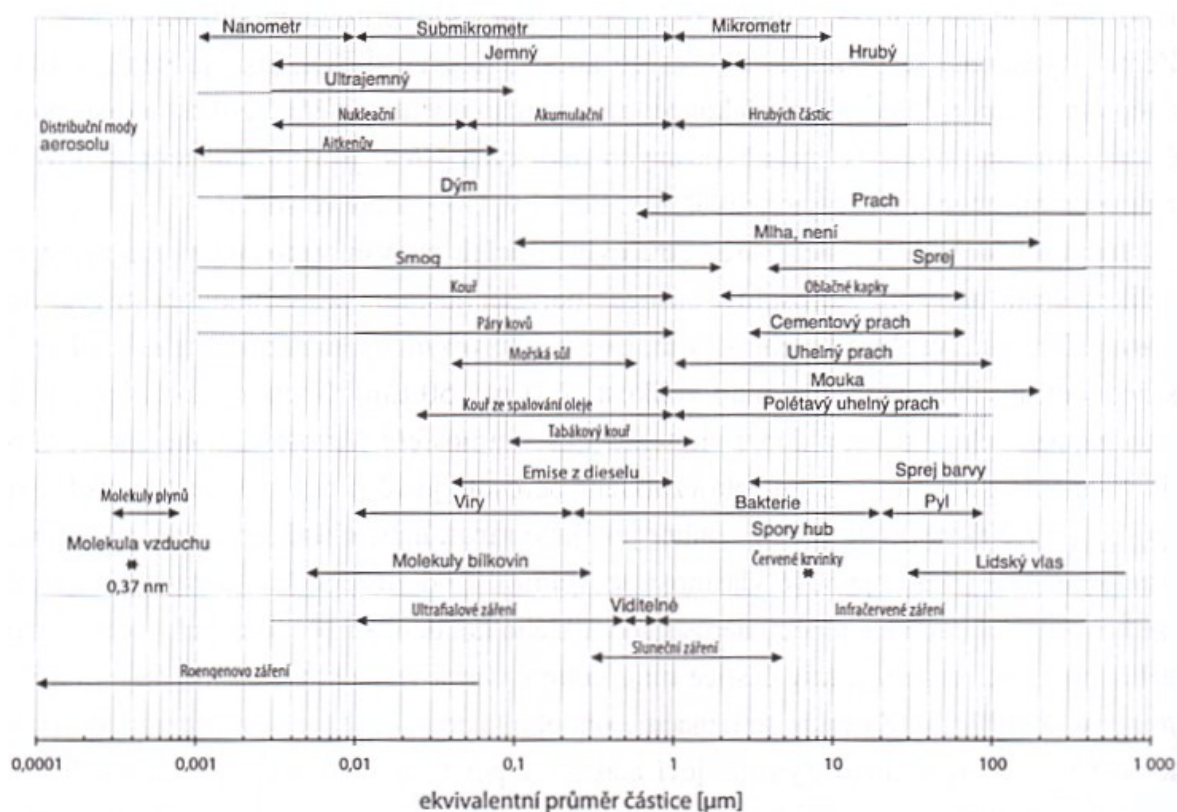
Kapalné částice mají většinou kulový tvar, zatímco částice pevné mohou mít nejrůznější tvary. I proto je vhodný aerodynamický průměr, který částicím přiděluje sférický tvar. Tvar



částice se tedy ve většině případů zanedbává, jelikož jen zřídka činí dvojnásobnou či vyšší změnu některé z vlastností (Hinds, 1999)

Velikost částice se nejčastěji uvádí v mikrometrech (pro částice pod 0,1  $\mu\text{m}$  je pak přesnější používat nm). Nejmenší částice dosahují téměř velikosti velkých molekul plynu (0,37  $\mu\text{m}$ ) a mají také podobné vlastnosti. Naopak velké částice mají omezenou stabilitu v atmosféře (Hinds, 1999). Pro částice menší než 1  $\mu\text{m}$  často platí, že jejich aerodynamický průměr je větší než skutečný geometrický, díky hustotě vyšší než 1  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Pro větší částice pak většinou platí opak (Braniš et al., 2011). Podle aerodynamického průměru jsou rozlišovány částice ultrajemné < 0,1  $\mu\text{m}$ ), jemné 0,1 – 2,5  $\mu\text{m}$  a hrubé 2,5 – 10  $\mu\text{m}$ , případně i nad 10  $\mu\text{m}$  (Hinds, 1999).

Dle velikosti částic můžeme aerosol dělit na monodisperzní nebo polydisperzní. Monodisperzní aerosol představuje soubor stejně velkých částic. V přírodě se však vyskytuje směs částic různé velikosti, jedná se tedy o polydisperzní aerosol. Takovýto aerosol však nemívá rovnoměrné zastoupení počtu různě velkých částic. Srovnání velikostních rozmezí některých částic je uvedeno na obrázku 2.



Obr. 2 Velikostní rozmezí některých částic atmosférického aerosolu a vymezení skupin aerosolových částic dle velikosti ekvivalentního průměru (Hovorka in Braniš et al., 2011 dle Hinds, 1999)

### 3.1.2 Sedimentace částic

Z hlediska pohybu částice v atmosféře je důležitým parametrem pádová rychlost ve stagnantní vrstvě atmosféry. Pro usazovací rychlost částice v tomto případě využíváme právě aerodynamický průměr ( $D_p$ ). Tato rychlost je pro aerodynamický průměr konstantní a je důsledkem rovnováhy gravitační síly s třecí silou. Pro stejně velké částice pak platí:

$$\rho_p C_{c,Dg} D_g^2 = \rho_0 C_{c,Dg} D_p^2 \quad (1)$$

kde  $\rho$  je hustota sledované částice  $p - \rho_p$  a  $\rho_0$  je hustota kulové standardizované částice,  $C_c$  je Cunninghamův korekční faktor podle průměru částice korigující skluz malých částic mezi okolními částicemi a molekulami.  $D_g$  je průměr geometrický a  $D_p$  je aerodynamický průměr částice.

Pro částice větší než  $1 \mu m$  (což je případ této práce) se dá rovnice zjednodušit, jelikož poměry  $C$  faktorů jsou přibližně 1 (Hinds, 1999):

$$D_p = D_g (\rho_p / \rho_0)^{1/2} \quad (2)$$

Pádová rychlost způsobená gravitací se pak pro částice s Reynoldsovým číslem (poměr rychlosti proudění v daném prostředí ku viskozitě) menším než 0,1 dá vypočítat:

$$V_{grav} = \rho_p C_c d_p g^2 / 18 \eta \quad (3)$$

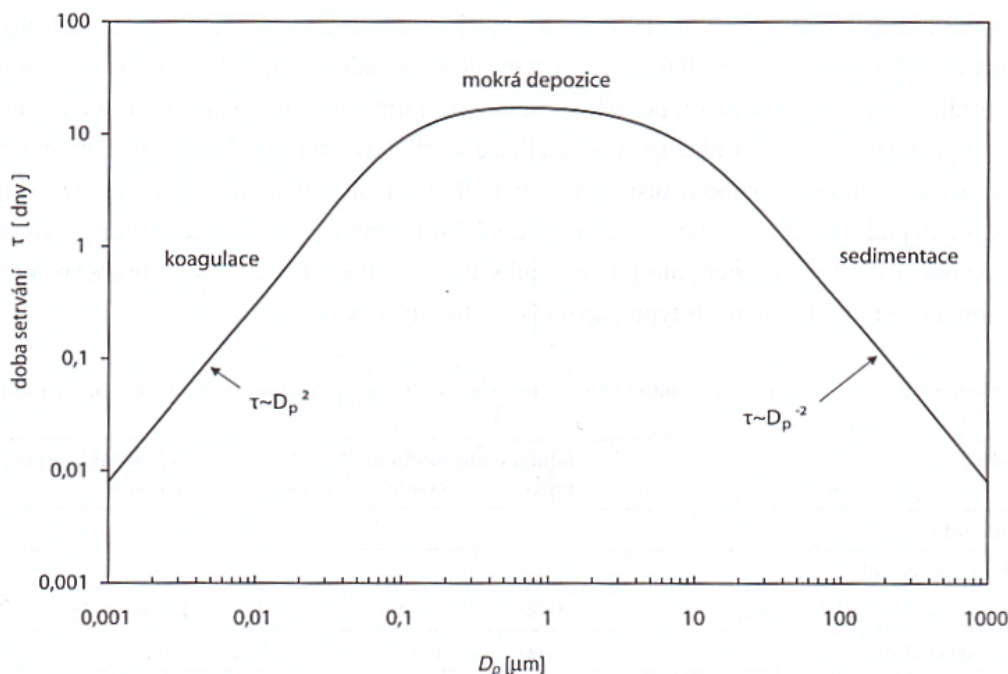
kde  $g$  je gravitační zrychlení a  $\eta$  dynamická viskozita.

Tato rychlost však platí zejména pro samostatné částice. Pokud jsou částice ve shluku o vyšší hustotě než okolní vzduch, fungují spíše jako celek, v němž vlastnosti částic o určité velikosti neodpovídají jejich chování mimo shluk. Rychlost usazování je pro tyto případy (Reynoldsovo číslo větší než 0,1) pak dána rovnicí:

$$V_{grav} = (4 \rho_p C_c d_p g / 3 \rho_g C_d)^{1/2} \quad (4)$$

kde nové proměnné jsou  $\rho_g$  - hustota plynu a  $C_d$  - odpor prostředí (Baron & Willeke, 2005; Hinds, 1999). V případě rychlosti usazování vykazují částice v oblaku daleko vyšší sedimentační rychlost než částice jednotlivé. Postupem času se ale rychlost zpomaluje, jelikož ve shluku může vznikat vnitřní cirkulace (Hinds, 1999).

S rychlostí usazování (a tedy  $D_p$ ) souvisí doba setrvání částice v atmosféře. V delším časovém úseku (rok a více) jsou procesy částice emitující a procesy odstraňující z atmosféry v rovnováze (Baron & Willeke, 2005). Částice mechanicky uvolněné, které počítáme jako větší než  $10\text{ }\mu\text{m}$  se vymývají srážkami, sedimentují nebo podléhají impakci a intercepci.



Obr. 3 Velikostní distribuce doby setrvání částic aerosolu a hlavními procesy, které částice odstraňují (Hovorka in Braniš et al., 2011)

U hrubého aerosolu doba setrvání záleží na sedimentační rychlosti a na turbulentním promíchávání přízemní vrstvy. Doba setrvání se pohybuje od hodin až po několik a dní a záleží na rovnováze mezi sedimentací a turbulentním promícháváním mezní vrstvy (Baron & Willeke, 2005).

Při mokré depozici deštěm platí, že čím delší a intenzivnější je déšť, tím zpravidla účinnost zachytu roste. U hrubého aerosolu je jen nízký vliv odstraňování difúzí (Hovorka in Braniš et al., 2011). Částice se kromě deště odstraňují samozřejmě i ostatními druhy srážek - vločky, horizontální srážky atd.

### 3.1.3 Hustota částice

Zbývajícím důležitým parametrem je hustota částice, nejčastěji uváděná v  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Částicím se přiřazuje hustota na základě jejich chemického složení, u některých se ale mohou vyskytovat vzdušné mikropóry nebo mohou být duté, a jejich hustota je tím výrazně snížena (např. kouřové částice) (Hinds, 1999).

### 3.1.4 Chemické složení

Chemické složení aerosolových částic závisí na jejich původu. Zatímco částice jemné, které mohou vznikat např. z plynných prekurzorů, obsahují třeba sloučeniny síry, hrubý aerosol obsahuje značné množství prvků zemské kůry: Si, Ca, Mg, Al, Fe (Hovorka in Braniš et al., 2011).

Na částice se mohou také navazovat toxické příměsi, čímž se např. pro lidské zdraví stává aerosol nebezpečný nejen mechanickým, ale i chemickým působením.

Velikost, tvar a hustota částice jsou nejdůležitějšími vlastnostmi ovlivňujícími chování částice (Hovorka in Braniš et al., 2011). Dle velikosti pak vybíráme fyzikální zákony, kterým bude částice nejspíše podléhat. Částice blízké velikosti molekule plynu ( $0,37 \mu\text{m}$ .) se budou pohybovat zejména Brownovým pohybem – difúzí. Bude-li částice v proudícím vzduchu, bude jednoduše následovat proudnice. Větší částice, jako jsou např. ty emitované povrchovou uhelnou těžbou, budou více podléhat gravitaci a budou mít větší setrvačnost ve svém vlastním pohybu (Hinds, 1999).

### 3.1.5 Popisné charakteristiky atmosférického aerosolu

U atmosférického aerosolu se nejčastěji určuje počet (N), hmotnost (M) a celkový povrch (S) částic. V této práci bude využito hmotnostní a početní koncentrace (M a N).

Hmotnostní koncentrace (mass concentration) – hmotnost částic v jednotkovém objemu aerosolu ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ). Hmotnostní koncentrace je ekvivalentem hustoty aerosolu, termín koncentrace se však používá pro předcházení záměnám s hustotou částice.

Početní koncentrace (number concentration) – počet částic v jednotkovém objemu aerosolu. ( $\text{počet} \cdot \text{m}^{-3}$ ).

Vzhledem k tomu, že je atmosférický aerosol souborem částic s velikostním rozsahem až pěti řádů, přičemž velikosti nejsou stejnoměrně zastoupeny, není nejvhodnější určovat M a N pro celý soubor. Tím bychom dostali výsledek, který by nám neřekl mnoho o původu, možném dalším chování nebo zdravotním nebezpečí tohoto souboru částic. Většinou se tedy částice rozdělují do několika velikostních frakcí (Hovorka in Braniš et al, 2011).

Pro monitoring jsou definovány 3 frakce dle velikosti  $D_p$  částic:

PM<sub>10</sub> – částice menší než 10 mikrometrů

PM<sub>2,5</sub> – částice menší než 2,5 mikrometru

PM<sub>1</sub> – částice menší než 1 mikrometr

Frakce jsou stanoveny na základě průchodu selektivním filtrem vykazujícím pro aerodynamický průměr 10  $\mu\text{m}$ , resp. 2,5  $\mu\text{m}$ , resp. 1  $\mu\text{m}$  účinnost 50 % (Prakash et al., 2016; Vyhláška č. 373/2009 Sb.).

Zvýšené koncentrace mohou mít negativní vlivy blíže popsané v kapitole 3.2. Negativní vlivy, a proto jsou pro frakce PM<sub>10</sub> a PM<sub>2,5</sub> jsou stanoveny tyto imisní limity:

Tab. 1 Imisní limity koncentrací PM<sub>10</sub> a PM<sub>2,5</sub> pro ČR a USA (Zákon o ochraně ovzduší; US EPA, 2018)

	ČR		USA	
	24-hodinový průměr	roční průměr	24-hodinový průměr	roční průměr
PM <sub>10</sub>	50 $\mu\text{g.m}^{-3}$ *	40 $\mu\text{g.m}^{-3}$	150 $\mu\text{g.m}^{-3}$	-
PM <sub>2,5</sub>	-	25 $\mu\text{g.m}^{-3}$	35 $\mu\text{g.m}^{-3}$	15 $\mu\text{g.m}^{-3}$ **

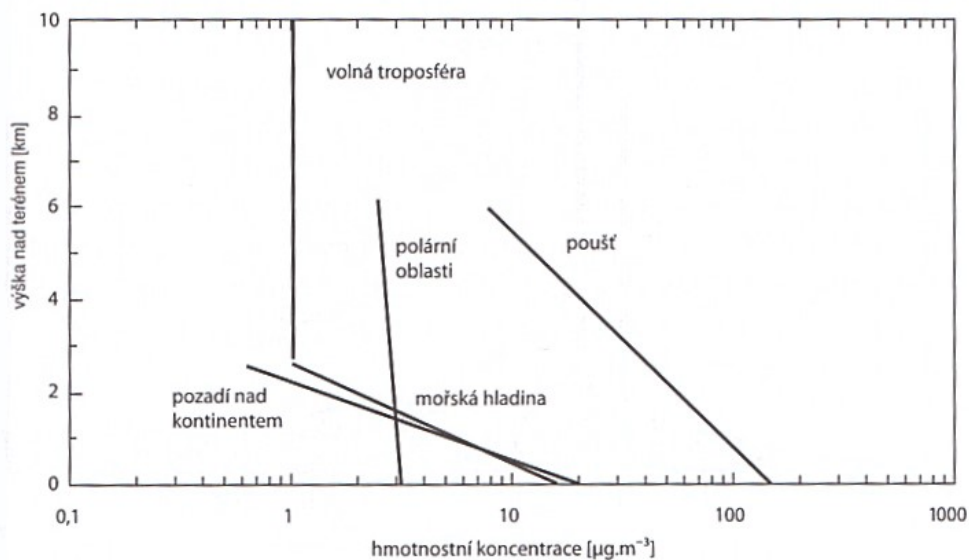
\* - překročením limitu je 35. nadlimitní koncentrace

\*\* - jedná se o tzv. „sekundární standard“, ve kterém se neodráží pouze vliv na lidské zdraví

Škodlivé účinky vykazují i nižší koncentrace než limitní, prakticky by ale bylo příliš složité a nákladné jich dosáhnout, byly proto zvoleny tyto limity. Pomineme-li možné toxické příměsi, jsou totiž částice atmosférického aerosolu polutantem bez prahové hodnoty účinku a bezpečná koncentrace tedy nelze stanovit (Anderson et al, 2012).

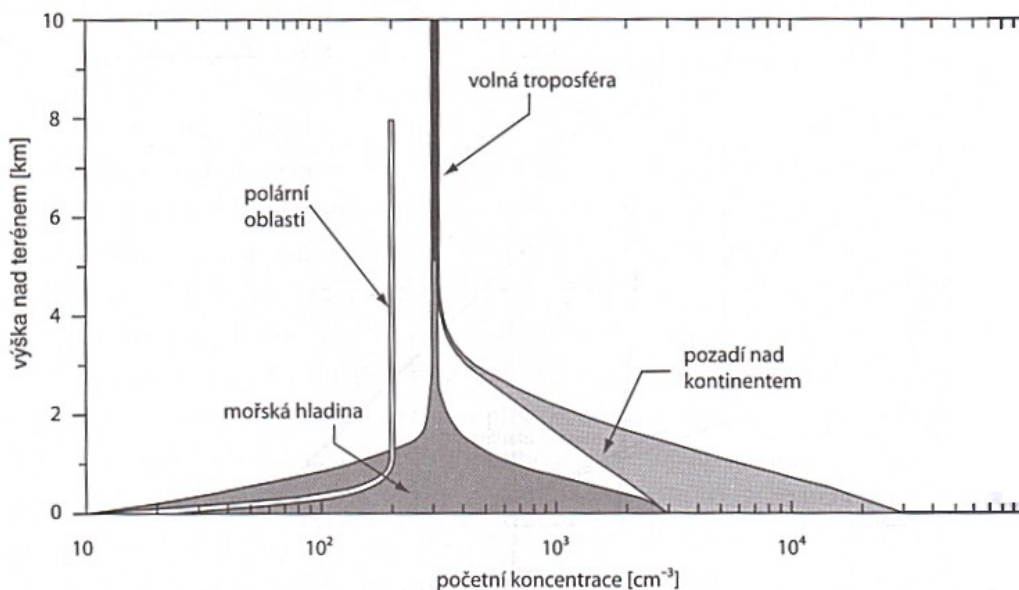
### 3.1.6 Vertikální distribuce aerosolu

Distribucí aerosolu se rozumí rozdělení částic do velikostních frakcí a přiřazování hodnot proměnných právě těmito frakcím. Hmotnost aerosolu určují zejména hrubé částice. Jejich koncentrace je díky distribuci, určované zejm. sedimentací, monotónní funkcí výšky nad terénem – s výškou exponenciálně klesá. Ve vyšších výškách je pak koncentrace více méně konstantní (Hovorka in Braniš et al., 2011).



Obr. 4 Vertikální distribuce hmotnosti částic atmosférického aerosolu (Hovorka in Braniš et al., 2011)

Vertikální distribuce počtu má průběh komplikovanější, jelikož s výškou může počet růst i klesat, jak ukazuje obrázek č. 5. Důvodem je lokalizace zdroje a jeho velikostní distribuce. Ve vrstvě vzduchu nad zdrojem koncentrace klesá, v pozad'ové vrstvě může s výškou naopak narůst. Ve vyšších vrstvách se ale bude snižovat počet částic hrubého aerosolu díky gravitaci, naopak počet ultrajemných částic může vzrůst, jelikož jejich hlavní cesta odstraňování – intercepce s povrchem s výškou klesá a částice se tedy tolik neodstraňují.



Obr. 5 Vertikální distribuce četnosti částic atmosférického aerosolu (Hovorka in Braniš et al., 2011)

Pro distribuci existují rovnice, které ale platí jen pro delší časové úseky (týdny a více). U kratších má větší vliv emisní tok a meteorologické podmínky, mohou se tedy výrazně měnit (Hinds, 1999).

### 3.2 Negativní vlivy

Zvýšené množství částic z těžby hnědého uhlí ve vzduchu může mít nepříznivé vlivy na lidské zdraví, a to nejen pracovníků uvnitř dolu, ale i obyvatel sídel v okolí a také na okolní faunu a flóru a lidské výtvořiny (Gautam & Patra 2015; Ghose & Majee, 2001; Huertas, 2014). Dýchání vzduchu obohaceného o částice menší než 10  $\mu\text{m}$  může vést k mnoha zdravotním komplikacím, zejména k nemocem dýchací soustavy nebo kardiovaskulárního systému, jelikož se jedná o respirabilní frakci (Prakash et al., 2016; Dockery & Pope, 1994 in Patra et al. 2016), částice mezi 1 – 2,5  $\mu\text{m}$  pronikají hluboko do plic (Dockery & Pope, 1994 in Patra et al. 2016). Větší částice takové nebezpečí nepředstavují, jelikož se zachytí uvnitř nosu, nebo v ústech a jsou spolknuty (Patra et al., 2016). Některé práce popisují spojitost mezi zvýšenou koncentrací aerosolu a zvýšenou úmrtností (Anderson et al., 2012; Pope & Dockery in Patra et al., 2016). Např. zvýšení koncentrace respirabilních částic PM10 o 10  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  vede ke zvýšení mortality o 0,7 – 1,6% (Triantafyllou et al., 2006).

Zvýšené koncentrace respirabilní frakce jsou spojeny s vyšším výskytem nemocí jako je astma, rakovina plic, nebo i Alzheimerovu a Parkinsonovu chorobu (Inyang & Bae, 2006; Pless-Mulloli et al., 2000; Quintana et al., 2006).

Zvýšená koncentrace aerosolu také přispívá k tvorbě smogu. Zimní smog již aerosolové částice v podstatě obsahuje v názvu, jelikož se jedná o spojení slov smoke + fog (kouř + mlha). Aerosol se podílí i na tvorbě letního smogu, zde jsou ale částice menší, obvykle pod 2  $\mu\text{m}$ . (Hovorka in Braniš et al., 2011). V ČR je zimní smogová situace vyhlášována dle vyhlášky 373/2009 Sb. na základě koncentrací PM10 a SO<sub>2</sub>.

Zvýšená koncentrace atmosférického aerosolu je jedním z největších problémů současného ovzduší v Evropě (Anderson et al., 2012). V některých státech je snaha zavést varovný systém založený na modelování meteorologických podmínek nejhorších pro obyvatele okolo dolů (Huertas et al., 2014).

### 3.3 Vliv na klima

Částice ve vzduchu také ovlivňují klima (Huertas, 2014). Atmosférický aerosol se podílí na globálním skleníkovém jevu. Jeho působení je ale komplikovanější, jelikož může skleníkový plyn zvyšovat i snižovat, záleží na velikostní distribuci a chemickém složení a

na vzdálenosti od zemského povrchu. V souhrnu se ale v klimatických modelech počítá v souvislosti se skleníkovými plyny ke snižujícímu potenciálu (Kalvová et al. in Braniš et al., 2011).

## 4 Povrchová těžba hnědého uhlí

Hnědé uhlí je jednou z nejdůležitějších těžených hornin pro Českou republiku. Napomáhá k energetické soběstačnosti České republiky, a proto je jeho těžba důležitá i z ekonomického a bezpečnostního hlediska. Hnědé uhlí bude i nadále používáno jako jeden z nejdůležitějších zdrojů v energetice v dohledné budoucnosti. Produkce hnědého uhlí za rok 2017 byla 36,5 mil. tun. Vzhledem k předešlým třem letům se jedná o nárůst, kdy v letech 2014-2016 průmyslová produkce nepřekročila 36 mil. tun, ale v letech předchozích již byla vyšší (Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2018b).

### 4.1 Povrchový důl jakožto emisní zdroj

Jedním z druhů těžby uhlí je povrchová těžba. V krajině je vytvořena otevřená důlní jáma, v níž je odtěžována skrývka (vrstva překrývající těženou surovinu) a uhlí pomocí velkých důlních zařízení. Emise závisí na počtu technologií a intenzitě jejich práce, na velikosti a reliéfu těžební jámy (Gautam & Patra, 2015). Oproti hlubinné těžbě produkuje povrchová těžba těchto znečišťujících látek více, jelikož se jedná o operace ve větším měřítku, při nichž jsou využívány těžší stroje.

Důl je přirozeně prašným prostředím díky větrné erozi. Jako prach se označují hrubé částice větší než 0,6  $\mu\text{m}$ ., které vznikly působením mechanických sil. Částice s aerodynamickým průměrem menším než 10  $\mu\text{m}$  zpravidla nejsou emitovány do ovzduší jednotlivě, ale vítr uvolňuje jejich shluky či celé vrstvy. Minimální velikost částic emitovaných mechanicky je právě 0,6  $\mu\text{m}$ , jelikož pod 1  $\mu\text{m}$  prudce narůstá síla adheze, která ztěžuje její uvolnění (Hovorka in Braniš et al., 2011)

Prašnost není ale jediným elementem znečišťujícím ovzduší. Z dolů také pochází plyny jako methan, oxid siřičitý a oxidy dusíku (Ghose & Majee, 2000), jejichž množství je však podle Chaulya (2004) zanedbatelné. Plyny vznikají zejména při záparch – samovolné oxidaci (vznícení) uhlí (Ghose & Majee, 2000).

Emisní tok částic pochází dále od důlních zařízení při činnostech jako je dobývání uhlí, vrtné práce, odstraňování a zpětné zakládání skrývky, drcení uhlí, pásová doprava a případně jiný transport a nakládání na vlak (Gautam & Patra, 2015; Huertas, 2014; Chakraborty et al.,



2002). Huertas (2012b) ale tvrdí, že právě větrnou erozí a pak transportem po nezpevněných cestách vzniká nejvíce částic. Situace ale může být specifická pro každý důl podle použitých typů přístrojů a důlní strategie (např. způsobu odvozu, místa úpravy uhlí nebo pohonu strojů).

Z hlediska uspořádání a povahy stálosti by se dal povrchový důl charakterizovat jako (velko)plošný stacionární zdroj. Je ale možné, že v některých patrech dolu a při určitých povětrnostních podmínkách se důl může jevit spíše jako soubor více bodových zdrojů. Pásové dopravníky by pak mohly představovat i zdroj liniový, ale v práci Dočekalové (2015) dopravníky vykazují charakter spíše bodových zdrojů. Tyto domněnky budou v práci dále diskutovány.

Mým předpokladem je, že by důl mohl sloužit nejen jako zdroj, ale i jako propad částic emitovaných zejména z okolních sídel, jelikož se takovýto jev zdál být při měření pozorován.

Některé práce uvádí, že z činnosti povrchových dolů pocházejí částice mezi 2,5–10  $\mu\text{m}$ , které se označují jako Coarse – hrubý aerosol (Aneja et al., 2012; Onder and Yigit, 2009). V jiných případech představují částice PM<sub>10</sub> jen přibližně čtvrtinu z celkové koncentrace částic (TSP – total suspended particles), průměrně velké částice mají velikost kolem 20  $\mu\text{m}$  (Ghose, 2002 in Huertas, 2012b). Huertas (2012b) ale zjistil nejvyšší zastoupení částic kolem průměru 5  $\mu\text{m}$ .

Kromě hrubých částic mohou být doly původcem i částic PM<sub>1</sub>, pokud dojde ke vzniku záparu (Grégr et al., 2011), nebo je významný provoz automobilů nebo jiných zařízení se spalovacím motorem (Hinds, 1999). Gautam & Patra (2015) pak dokládají emise všech velikostí částic v rámci frakce PM<sub>10</sub> z prostoru dolu s dominancí částic hrubých.

Míra znečištění jdoucího z dolu by měla záviset na povětrnostních podmínkách a ročních obdobích (teplota, srážky) (Pandey et al., 2014). Povětrnostní situace se ale mohou měnit v souvislosti se změnou ročních období, a proto díky proměnlivému směru vanutí větru mohou nastávat rozdíly v míře znečištění míst ve stejné vzdálenosti od dolu, avšak na jiných světových stranách (Ghoose & Majee, 2001). Nejvyšší koncentrace PM byly sledovány v zimních měsících, v oblastech sezónních dešťů pak naopak nejnižší (Ghose & Majee, 2000; Reddy & Ruj, 2003). Pro některé městské plochy jsou ale vysoké koncentrace patrné i v letních měsících.

Nejvyšší koncentrace se vyskytují uvnitř důlní jámy a s rostoucí vzdáleností od ní se snižují díky transportu, depozici a rozptylu, přičemž rozptyl se děje zejména ve směru

převažujícího celoročního směru větru (Jones et al., 2002; Trivedi et al., 2009; Huertas, 2012a), což bylo ale zjištěno za pomoci modelů. Dle Trivedi et al. (2009) by se znečištění částicemi ale nemělo šířit dále než 500 m od dolu.

## 4.2 Složení důlního prachu

Uhelný prach má velkou variabilitu velikosti částic (Hinds, 1999). Jedná se o částice o velikosti 1-100  $\mu\text{m}$ . Srovnání s ostatními částicemi je na obr. č. 2 v kapitole. 3.1.1. Velikost a tvar částice.

Huertas et al. (2012b) předpokládal v dole částice z rozdrčeného uhlí a jemné minerální částice z hlíny a částice ze spalování z výfukových plynů důlních automobilů (podle Jones et al., 2002). Částice hlíny pocházející z důlní činnosti bývají oblejší a vlhčí než typické minerální částice s ostrými hranami a snadněji tvoří agregáty (Huertas et al., 2012b). Dle Huertas (2014) se chemické složení prachu nejvíce podobá složení resuspendovaného prachu z okolí dolu.

Uhelný prach představuje heterogenní směs více než padesáti prvků a jejich oxidů (NIOSH, 1995 in Prakash et al., 2016). Obvyklé složení uhelného prachu představuje: křemen, kaolinit, ilit, kalcit, pyrit a síra (Prakash et al., 2016). Merefield et al. (1995) v uhelném prachu detekoval ještě chlorit, halit, montmorilonit, nebo dolomit (Merefield et al., 1995 in Jones et al., 2002). Minerální obsah se mění s velikostí částic a s místem, kde prach vznikl. Různé uhelné sloje totiž mohou mít různé složení. Minerální složení prachových částic je určováno zejména lokální geologií. Složení částic také mohou ovlivnit spaliny a výfukové plyny důlních automobilů (Jones et al., 2002). S ohledem na lidské zdraví představují největší nebezpečí krystalky křemene způsobující rozedmu plic a rakovinu (Inyang & Bae, 2006).

## 4.3 Distribuce částic v těžební jámě

Disperze částic povrchového dolu nejvíce záleží na geometrii dolu a lokálních meteorologických podmínkách (Gautam & Patra, 2015). Meteorologickými podmínkami jsou výrazně ovlivněné částice PM<sub>10</sub> a částice větší (Jones et al., 2002).

Gautam & Patra (2015) zkoumali distribuci aerosolu uvnitř jámy povrchového dolu zejména z důvodu vlivů na pracovníky uvnitř dolu – do jaké výšky až mohou částice vystoupat a jak dlouho v atmosféře setrvávají. Basslerová (2017) ale zjistila, že v České republice představují pro zaměstnance v dole velké zdravotní riziko spojené s inhalací částic i jejich vlastní činnosti jako např. kouření, které je zodpovědné za více než 75% emisí PM<sub>1</sub>

za pracovní směnu, koncentrace PM<sub>10</sub> je pak nejvyšší při uklízacích činnostech, které ale díky rychlejší sedimentaci nepředstavují zdravotní riziko po tak dlouhou dobu a jsou zodpovědné jen za 3-14% příspěvek k celkové koncentraci PM<sub>10</sub>.

Gautam & Patra (2015) předpokládají, že částice se postupně dostanou ven z dolu (projdou tedy všemi patry). Pro různě velké částice je různě velká rychlost tohoto postupu dolem. Připouští také, že větší částice díky vysoké sedimentační rychlosti mohou ve výsledném oblaku jdoucím z dolu chybět a ulpí na jiných patrech. Měření však bylo jen pozemní. Vyšlo z něj však najevo, že částice pocházející z hlubších pater lomu skutečně zvyšují koncentraci aerosolu i ve vyšších patrech.

#### 4.4 Proudění v dole

Primárním původcem přenosu částic z jednoho na druhé místo je vítr, jehož charakteristiky proudění záleží jak na meteorologických podmínkách, tak na geometrii jámy – hloubce, délce i šířce. (Gautam & Patra, 2015). Na koncentraci v dole se podílí nejen tvorba nových částic, ale i recirkulace částic již sedimentovaných, která se opět liší v různých částech dolu.

Chowdhary (1977) zjistil, že povětrnostní podmínky budou hrát větší roli v dolech, které jsou mělčí a v případě hlubších dolů bude ventilace významnější pro vyšší patra těchto dolů. Ve studii ale nebylo provedené měření, byl využit pouze model (Chowdhary, 1977 in Gautam & Patra, 2015). Toto je i můj předpoklad.

Některé z těchto modelů navíc nezahrnovaly rozdíly v pohybech částic v závislosti na jejich velikosti – velikostní distribuci. Čím hlubší důlní jáma je, tím je rozptyl částic komplexnější (složitější) kvůli nesprávnému odvětrávání lomu a hůře se tak predikuje možné chování částic (Gautam & Patra, 2015).

Proudění v dole může být na některých místech laminární, ale na jiných turbulentní. Směr větru se v dole často mění, a proto se chování částic v závislosti na něm špatně odhaduje (Gautam & Patra, 2015).

Pokud je vzduch v dole teplý, stoupá vzhůru a s ním i aerosolové částice. Ve spodních patrech dolu tedy částic ubývá a v souvislosti s promícháváním s chladnějším vzduchem dochází i k větší vertikální disperzi. Nejrovnoměrnějšího rozptylu částic je dosaženo v suchém vzduchu jen s mírným prouděním (Masters, 1998 in Patra & Gautam, 2016). Částice generované v hlubších patrech se rozptylují po směru větru. Proto vyšší patra jsou obohacena o PM z nižších pater, ne však o všechny velikostní frakce stejně, jelikož všechny částice se nepohybují stejnou rychlostí a se stejnými proporcemi. Hrubé částice (Coarse)

mají vyšší sedimentační rychlost a z emisního oblaku mohou ubývat. Zpravidla se tedy nedostanou do takových výšek jako jemnější částice (Cooper & Alley, 2014 in Patra & Gautam, 2016). Toto je v souladu s mou domněnkou, že důl je i propadem částic.

Pouze málo prací se zabývá monitorováním, jak se částice pohybují dolem po jednotlivých patrech výš a k povrchu terénu (Patra & Gautam 2016).

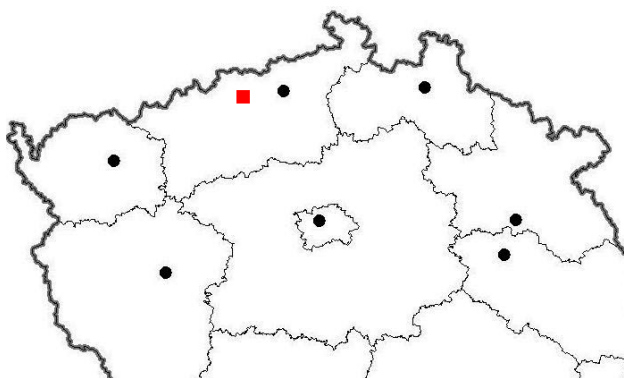
## 5 Metodika

### 5.1 Místo a čas

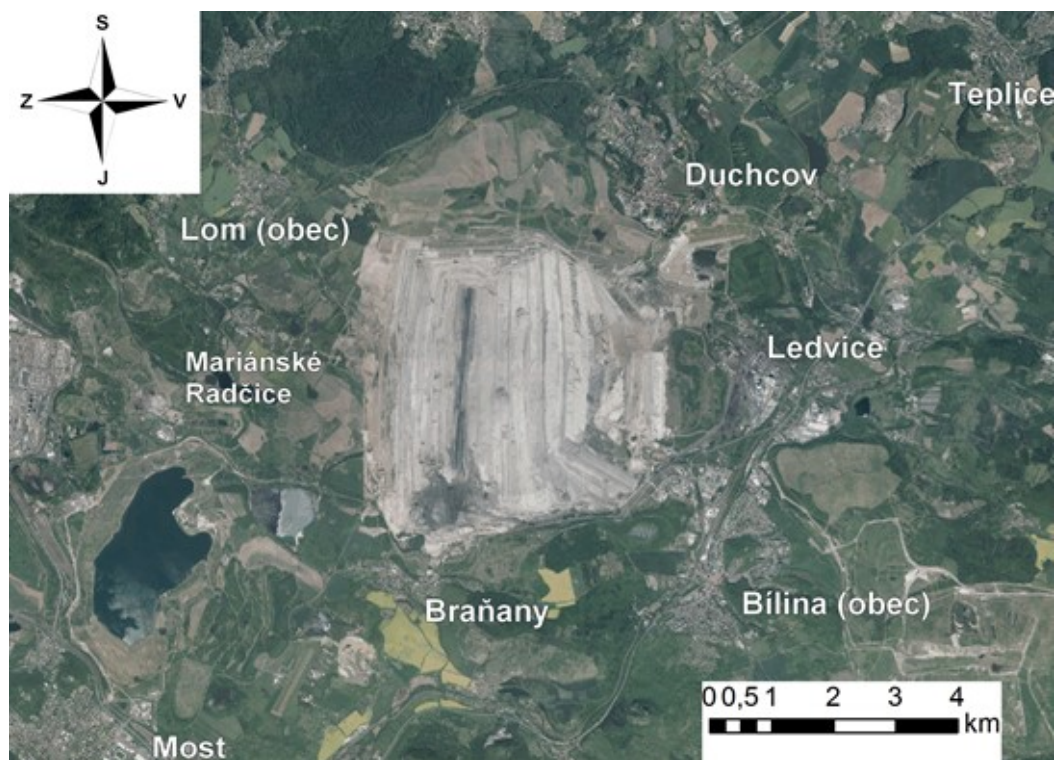
Měření koncentrací atmosférického aerosolu se uskutečnilo ve čtyřech dnech: 11., 18., 19. a 20. 12. 2017. Měření bylo situována do chladnější části roku, kdy se častěji vyskytují smogové situace, k nimž povrchová těžba může přispívat. Vznikající teplotní inverze mohou důl i s okolím uzavřít do jednoho systému a částice by se tak v ovzduší kumulovaly, nebo by naopak mohl být vzduch uzavřen v rámci těžební jámy, a bránit tak odchodu do okolí.

Místem experimentu byl lom Bílina, který se nachází v Mostecké pánvi na severu Čech.

Souřadnice: 50°34' s. š., 13°43' v. d.



Obr. 6 Výřez mapy ČR, přibližnou polohu dolu Bílina znázorňuje červený čtverec

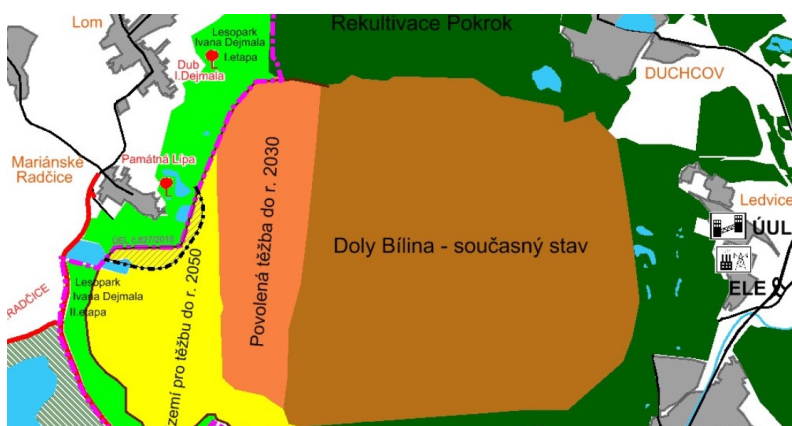


Obr. 7 Důl Bílina na letecké mapě s okolím

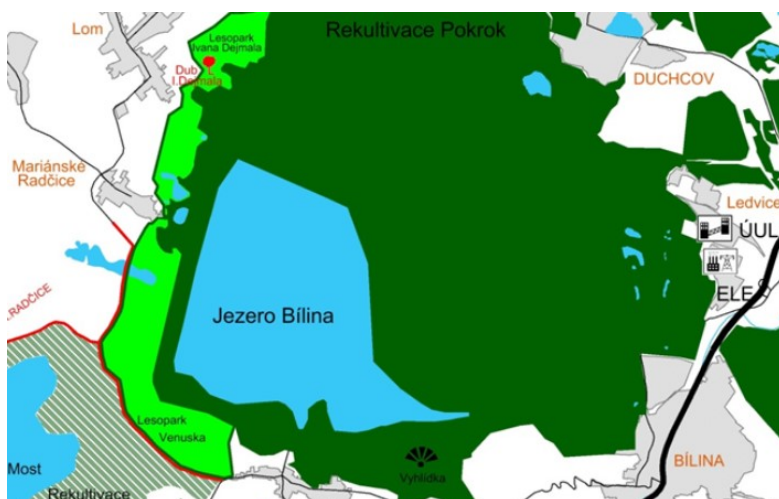
Lom Bílina patří společnosti Severočeské doly a.s. a v této souvislosti nese oficiální označení Doly Bílina.

Dobývací prostor dolu Bílina představuje 44 m<sup>2</sup> (Severočeské doly a.s., 2018b), přičemž plocha viditelně nezatravněné části lomu, ze které se potenciálně může prášit, je přibližně 22 km<sup>2</sup> (vlastní výpočet v programu ArcGIS).

V povrchovém dolu Bílina se těží hnědé uhlí, přibližně 9-10 mil. tun ročně. Kromě uhlí je nutné odtěžit ještě skryvku, jejíž množství se ročně pohybuje kolem 53 m<sup>3</sup>. Ukončení těžby se předpokládá na rok 2055, následně budou probíhat práce na rekultivaci (Severočeské doly a.s., 2018b).



Obr. 8 Schéma současného stavu a plánu těžby dolu Bílina (Severočeské doly a.s., 2018b)



Obr. 9 Plán rekultivace (Severočeské doly a.s., 2018b)

Těžba probíhá západním směrem, východní polovina lomu je již zpětně zakládána skryvkou. Uhlí je přepravováno pásovými dopravníky a velká část z něj se využívá jako palivo pro přilehlou elektrárnu Ledvice (na obr. 7, 8 a 9). Uhlí také využívají některé průmyslové podniky, teplárny a domácnosti.

## 5.2 Technologie v dole

Základními velkostroji manipulujícími se skrývkou a uhlím jsou v dole Bílina kolesová rýpadla a zakladače těchto typů (Severočeské doly a.s., 2018b):

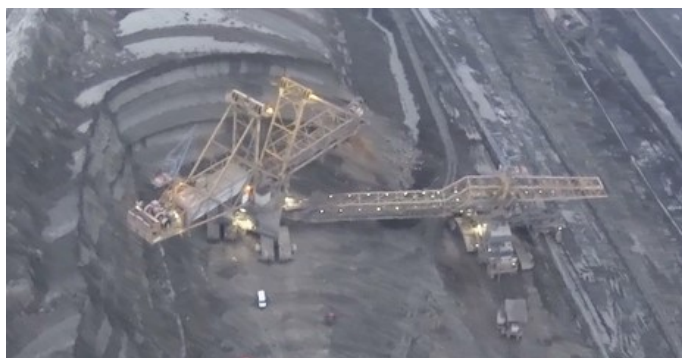
kolesové rýpadlo KU 300S, výška 27 m, těžba uhlí

kolesové rýpadlo typu KU 800, výška 52 m, těžba skrývky

zakladač skrývky ZP6600, výška 30 m



Obr. 10 Letecký snímek uhelného rýpadla KU 300S



Obr. 11 Letecký snímek skrývkového rýpadla KU 800



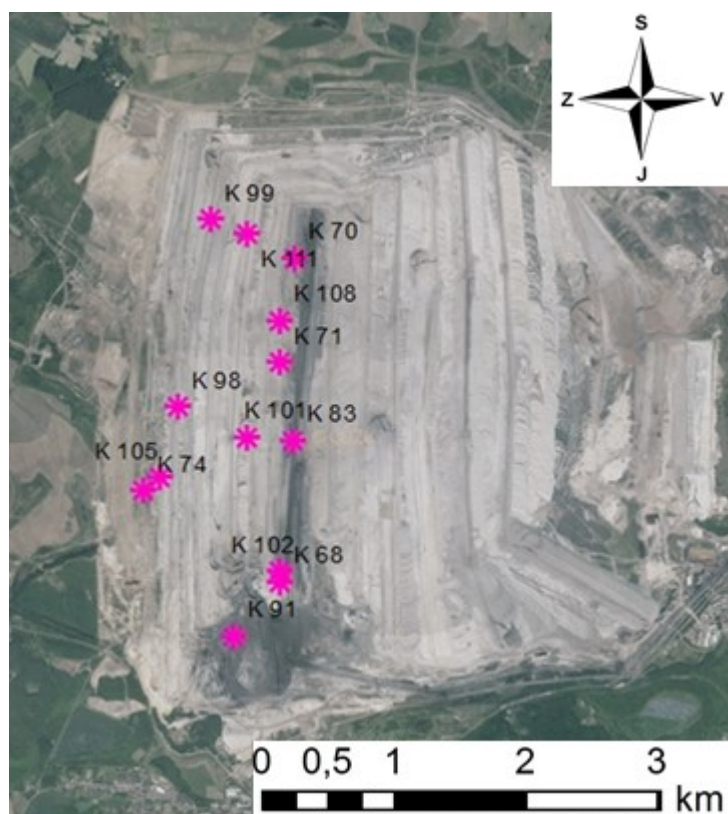
Obr. 12 Letecký snímek stanice pohánějící dopravníkový pás.



Na obr. 10 můžeme také vidět část překladače uhlí na pásový dopravník, který odvádí uhlí z dolu. Pásky jsou uváděny do pohybu poháněcími stanicemi (obr. 12 ). Všechny tyto důlní technologie jsou poháněny elektrinou s vlastní rozvodnou sítí v dole. Od společnosti Severočeské doly a.s. byly poskytnuty informace o poloze pouze kolesových rýpadel.

Tab. 2 Souřadnice kolesových rýpadel v systému S-JTSK k 11.12.2017

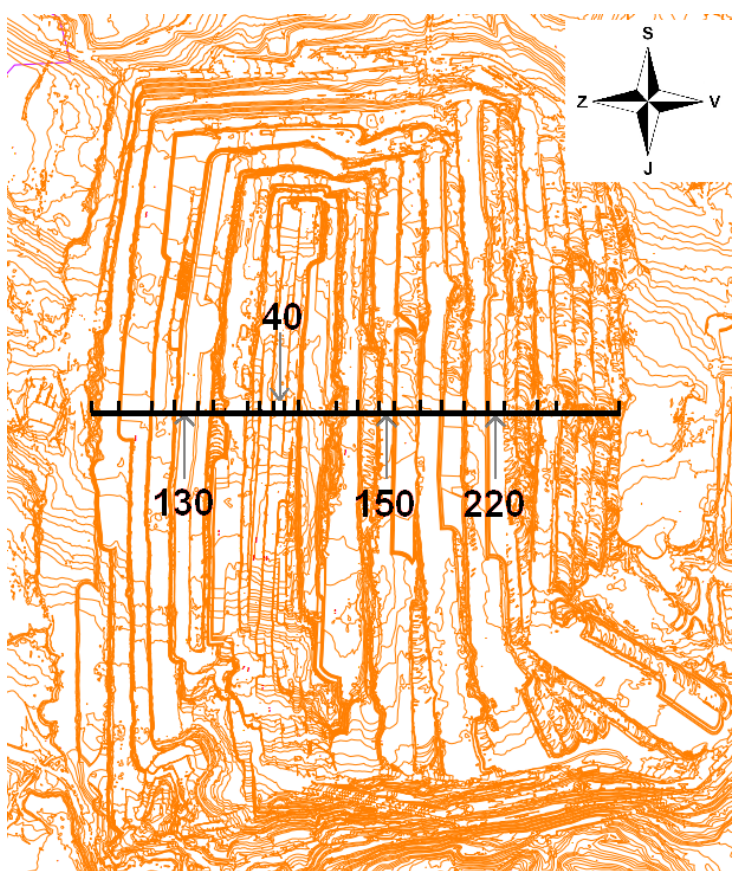
Rýpadlo	Nadmořská výška (m n. m.)	X S-JTSK (LO)	Y S-JTSK (LA)
K 74	242.13	-786461.07	-983323.03
K 105	212.7	-786330.30	-983219.52
K 98	188.3	-786192.14	-982664.66
K 99	153.3	-785922.24	-981194.28
K 111	121.07	-785640.36	-981305.72
K 101	82.8	-785636.91	-982904.34
K 71	60.6	-785386.43	-982317.99
K 91	185.9	-785752.01	-984472.81
K 108	62.9	-785388.30	-981989.10
K 68	89.3	-785384.95	-984042.52
K 70	47.8	-785263.06	-981496.83
K 83	16.9	-785284.37	-982931.60
K 102	87.3	-785386.57	-983956.51



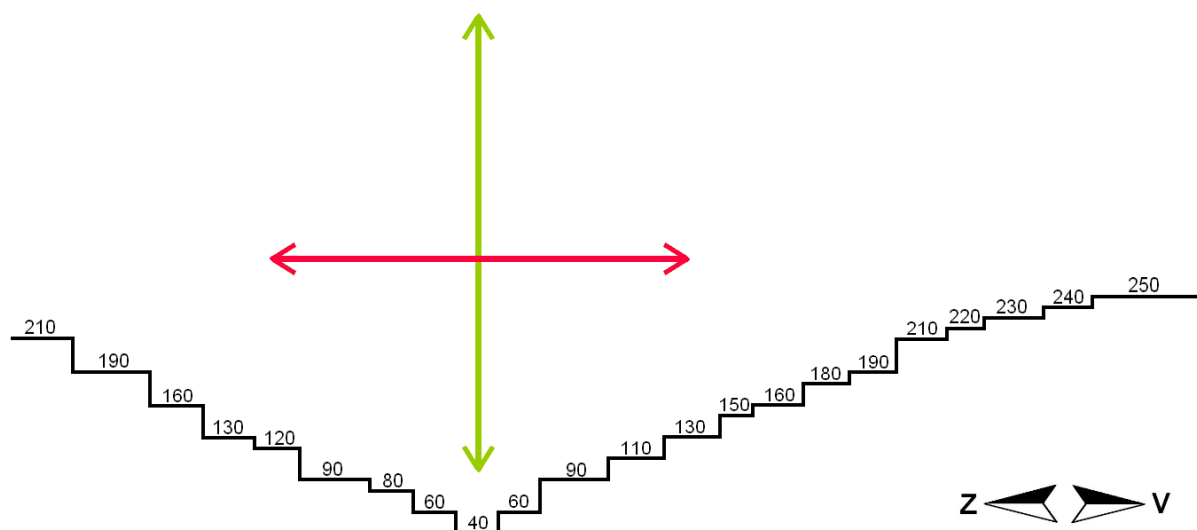
Obr. 13 Rozmístění rýpadel v dole Bílina k 11.12.2017



Důlní jáma je tvořena schodovitými patry o různých nadmořských výškách. Nejhlubší místo je méně než 40 m n. m. a nachází se v severní části nejhlubšího patra. Rozdělení na patra ukazují obrázky 14 a 15, kdy na obrázku 14 je zobrazení vrstevnicové a na obr 15 jsou pak vrstevnice převedeny ve schéma důlní jámy. Profil jámy na obr. 15 odpovídá výškovým poměrům v části obr. 14, která je vyznačena černou čarou. V obrázku 14 jsou pak pro lepší orientaci vypsány některé nadmořské výšky shodné s obrázkem 15. Mezi délkami a výškami jednotlivých schodů nejsou zachovány reálné poměry, nadmořská výška je pak zaokrouhlena na celé číslo. Šipky v obr. 15 znázorňují rozmezí horizontálních a vertikálních letů z kapitoly 5.5. Strategie letových měření (barevně sjednoceno).



Obr. 14 Vrstevnicové zobrazení dolu (poskytnuto Severočeskými doly a.s.)



Obr. 15 Profil důlní jámy – jednotlivá patra z přímky na obr 14, výška jednotlivých pater v m n. m. (růžová šipka = 285 m n. m., zelená šipka = přibližně 100 – 600 m n. m.)

### 5.3 Letová měření

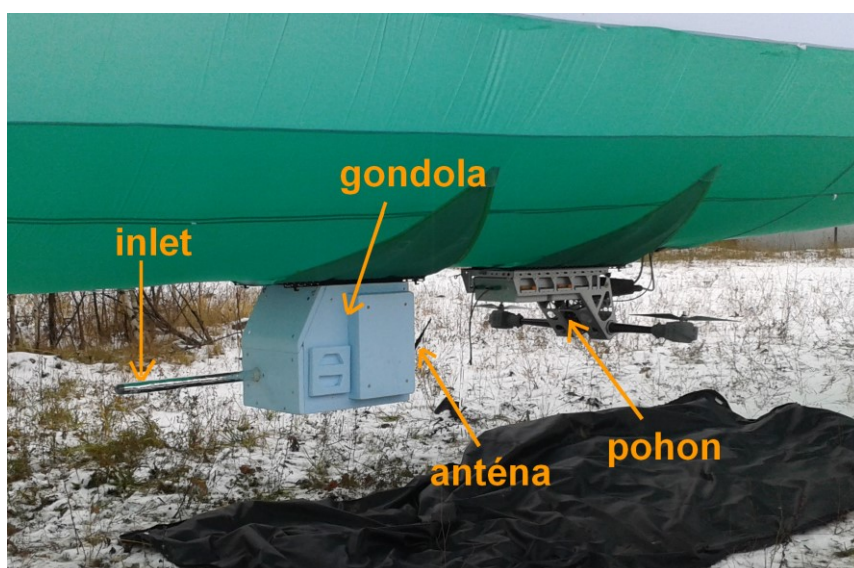
K měření koncentrace aerosolu v prostoru dolu bylo využito jedenáctimetrové vzducholodi na dálkové ovládání o nosnosti (efektivním zatížení) přibližně 15 kg. Vzducholod' je plněna héliem a poháněna elektřinou.



Obr. 16 Vzducholod'

Na spodní straně vzducholodi je umístěn pohon vzducholodi (vrtule) i s napájením (dva akumulátory) a modrá gondola, ve které se nacházejí přístroje. Z přední části gondoly vychází inlet, kterým proudí vzduch k přístroji uvnitř, na zadní straně jsou pak antény

k internetové komunikaci. Díky elektrickému pohonu a umístění vrtulí až za gondolou nedochází k tvorbě částic ani promíchávání vzduchu v místě odběru vzorků vzduchu.



Obr. 17 Detail spodní části vzducholodi

V gondole byl umístěn spektrometr APS, malý počítač a internetové připojení a powerbanka. Konkrétní informace o přístrojích se nachází v kapitole 5.4 Přístrojové vybavení.

## 5.4 Přístrojové vybavení

### 5.4.1 Měření koncentrace aerosolu

Klíčovým přístrojem k čítání koncentrací atmosférického aerosolu byl spektrometr APS – Aerosol Particle Sizer, model 3321, společnosti TSI®, který detekuje jednotlivé částice aerosolu, určuje jejich velikost a na základě velikosti rozděluje do skupin (kanálů), kterým stanovuje početní koncentraci, hmotnostní koncentraci a celkový povrch částic. V této práci je z přístroje využito koncentrace početní a hmotnostní.

APS rozlišuje velikost částic na základě jejich doby průletu mezi dvěma laserovými paprsky („time-of-flight“ spektrometr). Vzduch je přístrojem aktivně nasáván rychlostí  $5 \pm 0,1$  l/min (do laserové komory  $1 \pm 0,1$  l/min). Přístroj zaznamenává velikost každé částice, která jím proletí. Na základě její velikosti pak určuje hmotnost a povrch z předem navolených parametrů.

APS neukládá data do své paměti, je nutné ji připojit k počítači, k programu AIM – Aerosol Instrument Manager, který data zobrazuje, ukládá a nastavují se zde parametry měření.

### Parametry měření:

integrační čas: 1s

počet měřených vzorků: pokaždé jiný v závislosti na předpokládané délce letu

start měření: start dle odletu vzducholodi

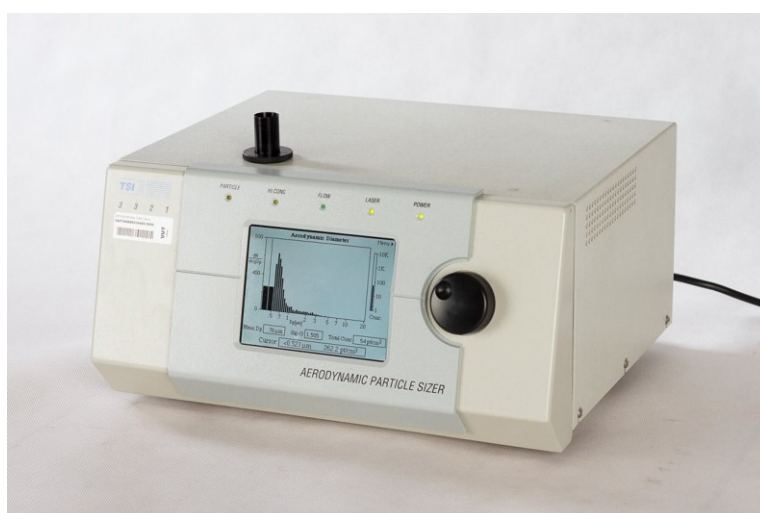
hustota částice:  $1,5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$

stokesova korekce: zahrnuta

korekce na inlet: zahrnuta

Integrační čas 1s byl synchronizován s frekvencí sběru dat vzducholodi, která svoji polohu také zaznamenávala každou sekundu. Doba trvání letů se odvíjela od kapacity akumulátorů, které ji napájely, a většinou byla stanovena mezi jednou až dvěma hodinami. Dle počtu sekund v tomto časovém úseku pak byl stanoven odpovídající počet vzorků ke změření, který pak byl uložen do samostatného souboru. První den (11.12.) bylo využito jiné strategie ukládání dat – do jednoho souboru. Nejspíše z důvodu příliš velkého množství dat se bohužel většina dat z tohoto dne v programu nezachovala.

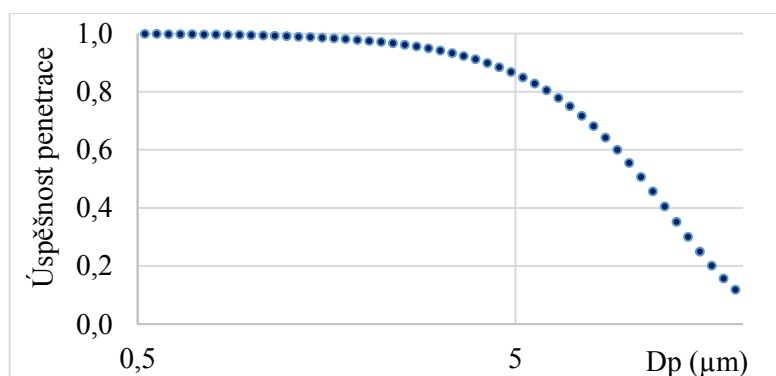
Hustota částice byla odhadnuta na základě znalosti hustoty částic uhlí ( $1,66 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ), zeminy (skrývky –  $2,73 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) (Civiš, 2010) a předpokladu přítomnosti dalších méně hustých částic. Mezi těžbou uhlí a skrývky co do počtu emitovaných částic není významný rozdíl (Onder & Yigit, 2009). Stokesova korekce zohledňuje schopnost částice reagovat na náhle změněné podmínky proudění, která závisí zejména na aerodynamickém průměru částice, její rychlosti a rychlosti okolního plynu (Baron & Willeke, 2005).



Obr. 18 APS (Energetické fórum, 2018)

Černý inlet ve vrchní části APS byl prodloužen, aby k nasávání částic docházelo v dostatečně volném prostoru, kde ještě nedochází ke změně proudění vzduchu v důsledku umístění gondoly. Inlet byl vyhříván na 45 - 60°C, aby došlo k odpaření případné vstupující vody kondenzované na částicích. Samotná APS pro svoji činnost také potřebuje určité teplotní rozmezí, kterému napomáhalo odpadní teplo z přístrojů udržované obalem gondoly.

Kvůli prodloužení inletu bylo potřeba vypočítat ztráty částic vzniklé vyšší pravděpodobností nárazu částice do stěny inletu, čímž docházelo k diskriminaci počtu částic, které se dostanou až k detektoru. Ztráty byly vypočteny dle počítadla Aerocalc (Aerosol calculator), autorem P. Baron. Vstupními parametry byla délka a průměr inletu, teplota a tlak vzduchu, hustota a velikost částice, rychlost proudění vzduchu (uvnitř inletu a v okolí). Jelikož APS dělí částice do jednotlivých velikostních kanálů, musela být vypočtena hodnota pro každý tento kanál, hodnoty v každém kanálu byly následně korigovány tímto faktorem v programu AIM. Vypočtené hodnoty úspěšnosti penetrace pro jednotlivé velikostní kanály zobrazuje obr. 19



Obr. 19 Úspěšnost průstupu částic inletem k APS v závislosti na aerodynamickém průměru

Rozdělení do kanálů se děje na základě aerodynamického průměru  $D_p$  ( $\mu\text{m}$ ) do těchto 52 kategorií, kde číslo označuje střed intervalu kanálu:

<0,523	1,286	3,278	8,354
0,542	1,382	3,523	8,977
0,583	1,486	3,786	9,647
0,626	1,596	4,068	10,37
0,673	1,715	4,370	11,14
0,723	1,843	4,698	11,97
0,777	1,981	5,048	12,86
0,835	2,129	5,425	13,82
0,898	2,288	5,829	14,86
0,965	2,458	6,264	15,96
1,037	2,642	6,732	17,15
1,114	2,839	7,233	18,43
1,197	3,051	7,773	19,81

APS detekuje částice o velikosti  $0,37 - 20 \mu\text{m}$ , velikostně pak rozlišuje částice o velikosti  $0,5 - 20 \mu\text{m}$ . Přesnost měření je u částic o velikosti jednotek mikrometrů  $0,02 \mu\text{m}$ , nad  $10 \mu\text{m}$  pak  $0,03 \mu\text{m}$ . Kvůli nižší jistotě hodnot v prvním kanálu byl u hmotnostních koncentrací tento kanál vynechán, jelikož jeho vliv na celkovou koncentraci byl zanedbatelný. U koncentrací početních naopak tvořil až polovinu všech částic. Trendy početních koncentrací bez a se započítáním první velikostní skupiny však v náhodně vybraných letech korelovaly (vždy  $R^2 > 0,85$ ), kanál <0,523 byl tedy připočten.

APS neposkytuje hraniční body vhodné pro stanovení koncentrací  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2,5}$  a  $\text{PM}_{10}$  (tedy  $1 \mu\text{m}$ ,  $2,5 \mu\text{m}$  a  $10 \mu\text{m}$ ), proto byly v této práci hodnoty hmotnostní koncentrace definovány součtem následujících kanálů:

$$\text{PM}_{10} = 0,542 - 1,037$$

$$\text{PM}_{2,5} = 0,542 - 2,458$$

$$\text{PM}_{10} = 0,542 - 10,37$$

Pro koncentraci početní byl tento interval rozšířen o zmiňovaný první kanál.



Dále byla určována koncentrace hrubých částic, tzv. Coarse, která byla pro tuto práci definována jako:

$$\text{Coarse} = \text{PM}_{10} - \text{PM}_1$$

Označení „Coarse“ bude používáno pro hrubou frakci v celé práci. Pro účely této práce je označení PM<sub>1</sub>, PM<sub>10</sub> apod. užito v souvislosti jak s hmotnostní koncentrací, tak s koncentrací početní. Druh koncentrace je od sebe možno rozlišit podle různých uvedených jednotek.

V našem případě byl (z neznámého důvodu) přístrojem vynechán kanál 19.81.

Maximální množství částic, které je spektrometr schopný stanovit, dosahuje 10 000 částic·cm<sup>-3</sup> a 200 000 částic·s<sup>-1</sup>.

APS byla připojena k akumulátorům pohánějícím vzducholod'.

V gondole vzducholodi byl umístěn mini počítač, který byl ovládán přes vzdálenou plochu na notebooku ze země. Výhodou připojení ke vzdálené ploše byla možnost online sledování měnicích se koncentrací vstupujících do APS v průběhu letu.

Ke spodní části vzducholodi byla občas připojena ještě kamera, která snímala situaci v dolu při letu. Pořízena byla tři videa.

#### 5.4.2 Měření teploty

Na přídi vzducholodi byla umístěna radiosonda Vaisala, která měla v našem případě sloužit zejména k měření teploty, bohužel se ale vyskytla technická závada a z většiny letů podala jen několikaminutové záznamy, kdy se vzducholod' ještě nenacházela v dobývacím území, a záznamy o teplotním zvrstvení v dole tedy chybí.

#### 5.4.3 Anemometry

Na území dolu byly umístěny dva 3D anemometry Ultrasonic anemometer WindMaster společnosti GILL. Určují vanutí větru ze 4 světových stran a ze směrů nahoru a dolů. Dále měří světelné záření, teplotu, vlhkost a rychlost větru, a to s frekvencí jedné minuty.

Tab. 3 Souřadnice anemometrů

Anemometr	Nadmořská výška (m n. m.)	X (LO)	Y (LA)
A 1	314	-782839	-981672
A 2	221	-786231	-983474

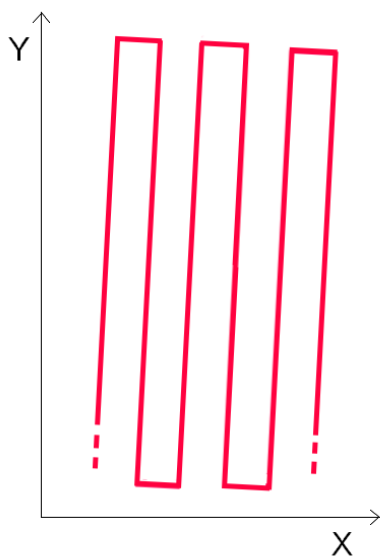
Anemometry byly zapůjčeny a musely být v dole instalovány již 30.11. Nebylo tedy možné provést laboratorní srovnání jejich měření. Srovnání bylo provedeno na základě dlouhodobého měření uvnitř dolu. Předpokládám, že teplota, vlhkost a záření by se v takto blízkých místech nemělo výrazně lišit, u charakteristik větru tomu ale může být jinak. Korelace teplot je s hodnotou spolehlivosti  $R^2 = 0,9529$ , pro rychlost větru  $R^2 = 0,3021$ , pro směr větru (světové strany)  $R^2 = 0,0797$  a pro směr větru shora zdola  $R^2 = 0,0017$ . Záření nebylo pro práci považováno podstatné, proto hodnota  $R^2$  není vytvořena, pro vlhkost není vytvořena z důvodu pravděpodobné nefunkčnosti jednoho z anemometrů, který po velkou část doby ukazoval vlhkost 100%, ač druhý anemometr vykazoval jiné pohyby hodnot. Z těchto výsledků tedy můžeme usoudit, že srovnání stejnosti měření anemometrů povětrnostních charakteristik nejspíše není možné učinit, jelikož se hodnoty silně rozcházejí, pakliže předpokládáme, že tyto rozdíly nejsou způsobeny odchylkou jednoho z anemometrů. Teplotní chod v obou částech dolu se zdá být podobný. Jelikož ale byly hodnoty vytvořeny na základě měření v terénu, nelze jim přisuzovat značnou jistotu. Grafické zobrazení hodnot, ze kterých byly údaje získány (data za celou dobu, kdy byly anemometry umístěné v dole), je k prohlédnutí v Příloze č. 1.

Kromě dat z anemometrů jsem si zaznamenávala ještě počasové situace, které anemometr přímo nestanovuje (např. srážky).

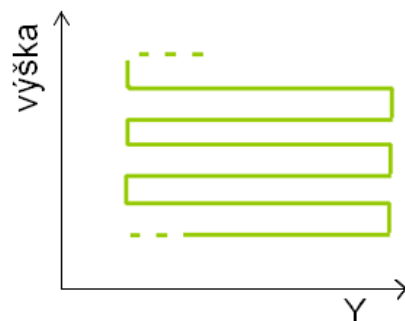
### 5.5 Strategie letových měření

Vzducholoď vykonávala dva základní typy letů – horizontální a vertikální. Horizontální let mapoval část dolu (podle dosahu signálu spojení řídicího vozu se vzducholodí a kapacity akumulátorů) v jedné výškové hladině; vertikální let probíhal nad nejhlubším patrem dolu v různých výškách. Ve dvou případech se uskutečnil ještě let šroubovicový, kdy se vzducholoď snažila kroužit a zároveň stoupat vzhůru.

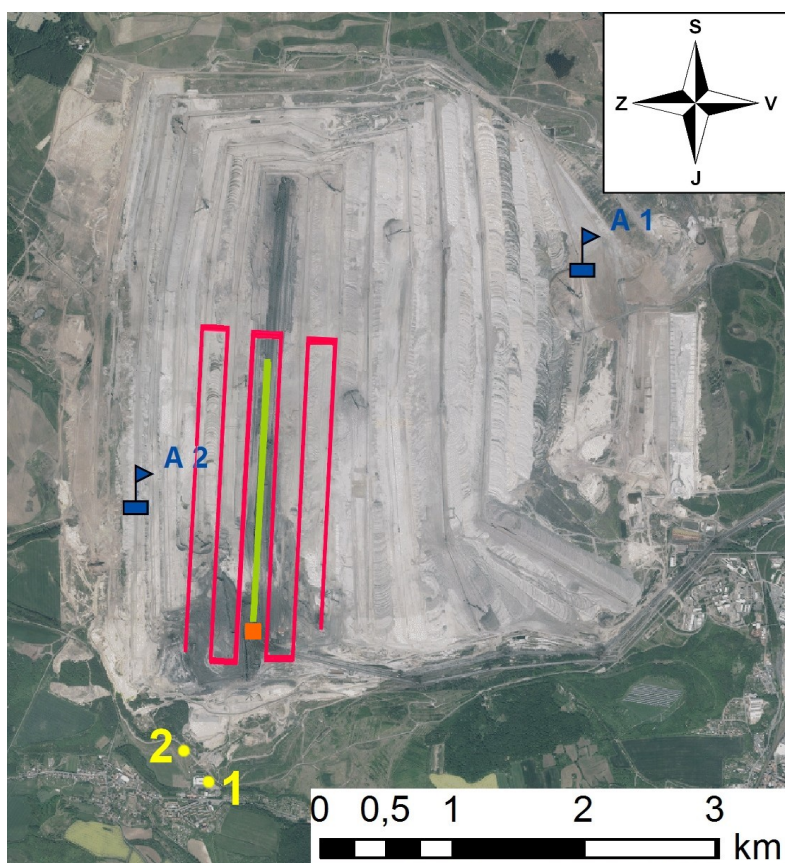




Obr. 20 Schéma horizontálního letu



Obr. 21 Schéma vertikálního letu



Obr. 22 Schémata letů uvnitř dolu

Lom Bílina je nejhlubším hnědouhelným domem v České republice. V souvislosti s výškou rypadel až 52 m tak bylo možné bezpečně letět nejhloub ve výšce 110 m n. m. (tedy -175 m vzhledem k odletovému místu).

Nejvzdálenější a nejvyšší místa letu pak byla opět limitována signálem vzducholodi a kapacitou akumulátorů. Na jedno nabití vzducholod' většinou vydržela letět 1,5 – 2 hodiny.

Na obr. 22 jsou kromě vsazení schémat horizontálního a vertikálního letu umístěny ještě anemometry (modré vlajky A1 a A2), dva žluté body (1, 2) a oranžový čtverec. Oranžový čtverec je dále vysvětlen v kapitole 5.6 Zpracování dat. Žluté body zobrazují odletová místa. První odletové místo bylo předem plánované, ale neukázalo se jako příliš vhodné, proto bylo posléze změněno odletové místo na č. 2. Odletové místo číslo 2 má nadmořskou výšku přibližně 285 m n. m. a je bráno jako tzv. nulová hladina, ve které se prováděly horizontální lety a vůči níž jsou uváděny hodnoty vertikálních letů do plusovým a minusových hodnot. Bohužel první den bylo za nulovou hladinu bráno místo č. 1, které se nachází se níže, proto mají lety z 11.12. jinou nulovou hladinu. Popisy všech letů se nachází v tabulce 4.

Tab.4 Seznam letů (H – horizontální let, V – vertikální let, S – šroubovicový let)

Datum	Číslo letu	Odlet		Přílet		Typ letu (hladina m n. m.)
		Čas (UTC+1)	Stanoviště	Čas (UTC+1)	Stanoviště	
11.12.	1	10:58	1	12:14	1	H 230 - 265
	2	13:42	1	14:40	2	H 230 – 265 (+ 300 – 360)
	3	14:51	2	15:33	2	H 230 - 265
18.12.	1	16:56	1	18:41	2	H 265 – 300
	2	19:02	2	20:09	2	V
	3	20:24	2	21:32	1	V
19.12.	1	8:03	1	9:10	2	V
	2	9:23	2	10:22	2	V
	3 + 4	10:39	2	11:47	2	H 230 – 265 +S
	5	11:57	2	13:06	2	H 265 - 300
	6	13:18	2	14:19	2	V
	7	14:29	2	15:38	2	V
	8	15:49	2	16:50	2	V
	9	17:00	2	17:43	1	V+S
20.12.	1	9:43	2	10:04	2	V

Poznámky k tabulce č. 4:

11.12. 01 - **video**

18.12. 02 - profil (-100 až + 150m), (-100 až 0m) po 20m, (0m až +150m) po 25m

18.12. 03 - profil (-100 až + 300m), (-100 až 0m) po 20m, (0m až +200m) po 25m, (+200 až +300m) po 50m

19.12 01 - profil (-175 až +300m), po 25m (-175 až 0m), po 50m (0 až +300m); **video**

19.12. 02/03 - profil (-175 až +300m) po 25m; v průběhu vrácení vzducholodi a tím let rozdělen na dva, v měřených datech ale jen jeden let, dále bude označován jako č. 2

19.12. 04 - snaha o spirálový let kolem anemometru (přibližně +50 až +280m), pak horizontální let

19.12. 06 - profil (-175 až +300m), (-175 až 0m) po 25m, (0 až +300m) po 50m; **video**

19.12. 07 - profil (-125 až +300m), (-125 až +250m) po 25m, (+250 až +300m) po 50m

19.12. 08 - profil (-175 až +300m), (-175 až 0m) po 25m, (0 až +300m) po 100m, v průběhu snaha o spirálový let kolem rypadla

19.12. 09 – profil (-150 až +300m) po 50m, silný vítr - vzducholod' příliš nedodržovala předepsanou trasu

20.12. 01 – profil (-150 až 0m) po 50m

Výšky v tab. 4 a poznámce jsou uváděny vzhledem k nulové hladině 285 m n. m. 300m výšky je tedy přibližně 585 m n. m. (prakticky ale vzducholod' ve vyšších nadmořských výškách létala z neznámého důvodu o něco níže a maximální dosažená hladina je 560 m n. m.), -175 m pak představuje přibližně 110 m n. m.

## 5.6 Zpracování dat

Data z APS byla ukládána do databáze programu AIM a pro další zpracování bylo nutné je exportovat. Data o pohybu vzducholodi byla v textové podobě. Díky stejným časovým intervalům mezi daty z APS a ze vzducholodi byl čas použit ke spárování dat, čímž byla koncentracím přiřazena zeměpisná poloha. Vzducholod' pořizovala data ve světovém čase (UTC), APS ve středoevropském (UTC+1). Jelikož občas spojení mezi vzducholodí a řídicím pultem vypadávalo, vznikly v datech o poloze mezery. Tyto chybějící hodnoty byly doplněny lineární regresí v programu R. Většina dalších úprav dat se uskutečnila v programu MS Excel, kde byly ze surových dat vypočítány hodnoty PM1, PM10, apod. Méně úprav pak v programu CoStat. Pro kontrolu dat (zejména o polohách velkostrojů) a k pomoci s interpretací dat posloužily programy Action Movie Cam Creator a Play Memories Home. Grafické zpracování hodnot se pak uskutečnilo v programech ArcGIS a CoPlot, finální úprava některých obrázků proběhla v programu PhotoFiltre.

Data z anemometrů byla vyhodnocována v programech CoPlot, R a WindRose PRO3 (program pro tvorbu větrných růžic).

Export z programu AIM byl proveden ve čtyřech variantách: koncentrace M ( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) a N ( $\text{částice} \cdot \text{m}^{-3}$ ) a koncentrace normalizované na velikost intervalu jednotlivých kanálů velikostí částic  $dM/d\log D_p$  ( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) a  $dN/d\log D_p$  ( $\text{částice} \cdot \text{m}^{-3}$ ). Koncentrace M a N posloužily k výpočtům PM1, PM10 atd., normalizované koncentrace byly použity pro velikostní distribuce. Hmotnostní koncentrace byly převedeny z  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$  na  $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ .

Do programu ArcGIS byly importovány v Excelu upravené hodnoty koncentrací a polohy, které se na základě přiřazení do systému S-JTSK zobrazily v mapě. Následně bylo provedeno odstranění částí letu mimo důlní jámu a v nevyhovujících nadmořských výškách (v kapitole Výsledky občas patrné jako krátká mezera v souvislém zobrazení dat v mapě). Horizontální lety byly na základě nadmořských výšek rozděleny do tří kategorií:

1. 230 – 265 m n. m. (230 – 265,5)
2. 265 – 300 m n. m. (265,6 – 300,5)
3. 300 – 360 m n. m. (300,6 – 360)

Kolem hodnot 265 a 300 byly desetinné hodnoty do intervalů rozdělovány na základě zaokrouhlení, přesná rozmezí jsou uvedena v závorkách za označením těchto intervalů, které je používáno v dalším textu.

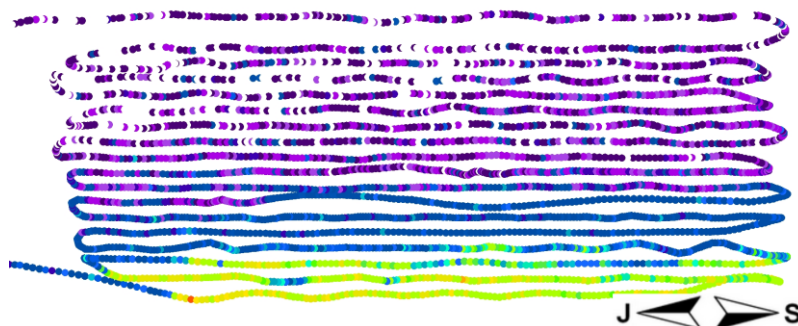
Podobná rozdělení se týkají i letů vertikálních, kde je rozmezí letových hladin menší a hladin je mnohem více, proto jsou označovány jen středem intervalu plánované letové hladiny.

Tab. 5 Příklady výškových hladin vertikálních letů s jejich rozmezími

Stoupání po 25 m		Stoupání po 50 m		Stoupání po 20 m	
Hladina (m n. m.)	Rozmezí (m n. m.)	Hladina (m n. m.)	Rozmezí (m n. m.)	Hladina (m n. m.)	Rozmezí (m n. m.)
110	98 – 122	285	273 – 297	110	100 – 120
135	123 – 147	335	322 – 347	130	121 – 140
160	148 – 172	385	373 – 397	150	141 – 160
185	173 – 197	435	422 – 447	170	161 – 180
210	198 – 222	485	473 – 497	190	181 – 200
235	223 – 247	... a obdobně v dalších výškách			

Hladiny u stoupání po 50 m jsou uvedené od 285 m, jelikož toto byl nejčastější bod změny z 20 nebo 25 m na 50 m (jedná se o nulovou hladinu). U stoupání po 25 a 50 jsou hladiny i rozmezí stejná a tvoří se odečtením 13 a přičtením 12 m. Číslo hladiny neznamena průměrnou nadmořskou výškou letu v hladině.

Rozmezí hladin po 25 m bylo využito při tvoření datové mřížky – funkce „grid“ v programu CoPlot při tvorbě vertikálních grafů (výška x vzdálenost x koncentrace). Pro zobrazení takového grafu je potřebné mít pravidelnou síť bodů, kterou surová data neposkytují a ze které jsou následně dopočteny hodnoty míst, kde se data neměřila.



Obr. 23 Reálné grafické zobrazení vertikálního letu

Na obr. 23 vidíme původní vzhled grafu, ze kterého později mřížkováním vznikly grafy, které jsou umístěny v Příloze 3. Pro vytvoření mřížky byl na ose y (výška) tedy použit rozestup 25 m, na ose x (vzdálenost) byl zvolen rozestup 10 m. Osa Vzdálenost má svůj bod nula v LA (y-ové) S-JTSK souřadnici -984500. Tento bod je vyznačen oranžovým čtverečkem na obr. 22.

Po hladinách jsou také rozděleny grafy distribucí, k nimž bylo připočteno také MMD a CMD.

MMD – mass median diameter je aerodynamický průměr částice o mediánu hmotnosti a byl získán vytvořením procentuálních kumulativních hmotností jako hodnota aerodynamického průměru u hmotnostní koncentrace 50%. Hodnota 50% byla dopočtena ze dvou nejbližších bodů rovnici přímky.

CMD – count median diameter je aerodynamický průměr částice o mediánu četnosti. Ten byl získán přepočtem z MMD přes Hatch-Choatovu rovnici (Hinds, 1999):

$$D_a = \text{CMD} \exp(b \ln^2 \sigma_g) \quad (4)$$

kde  $D_a$  je charakteristický průměr částice, který pro výpočet používáme – v mém případě MMD,  $b$  je hodnota závislá na zvoleném průměru a v případě MMD je vždy 3,  $\sigma_g$  je standardní směrodatná odchylka od CMD, která byla získána výpočtem díky vztahům:  $\text{MMD} \cdot \sigma_g = 84,1\%$  a  $\text{MMD} / \sigma_g = 15,9\%$ . Hodnoty pro 84,1% a 15,9% byly získány stejným způsobem jako u 50%. Grafické zpracování pak proběhlo v programu CoPlot.

Stanovení MMD tímto způsobem není zcela správné, jelikož není vhodné pro bimodální distribuci, která se v některých případech v mé práci vyskytuje. K výpočtu ale nebyl k dispozici lepší software, který by si s více mody dokázal poradit. Výsledky je proto nutno brát s rezervou.

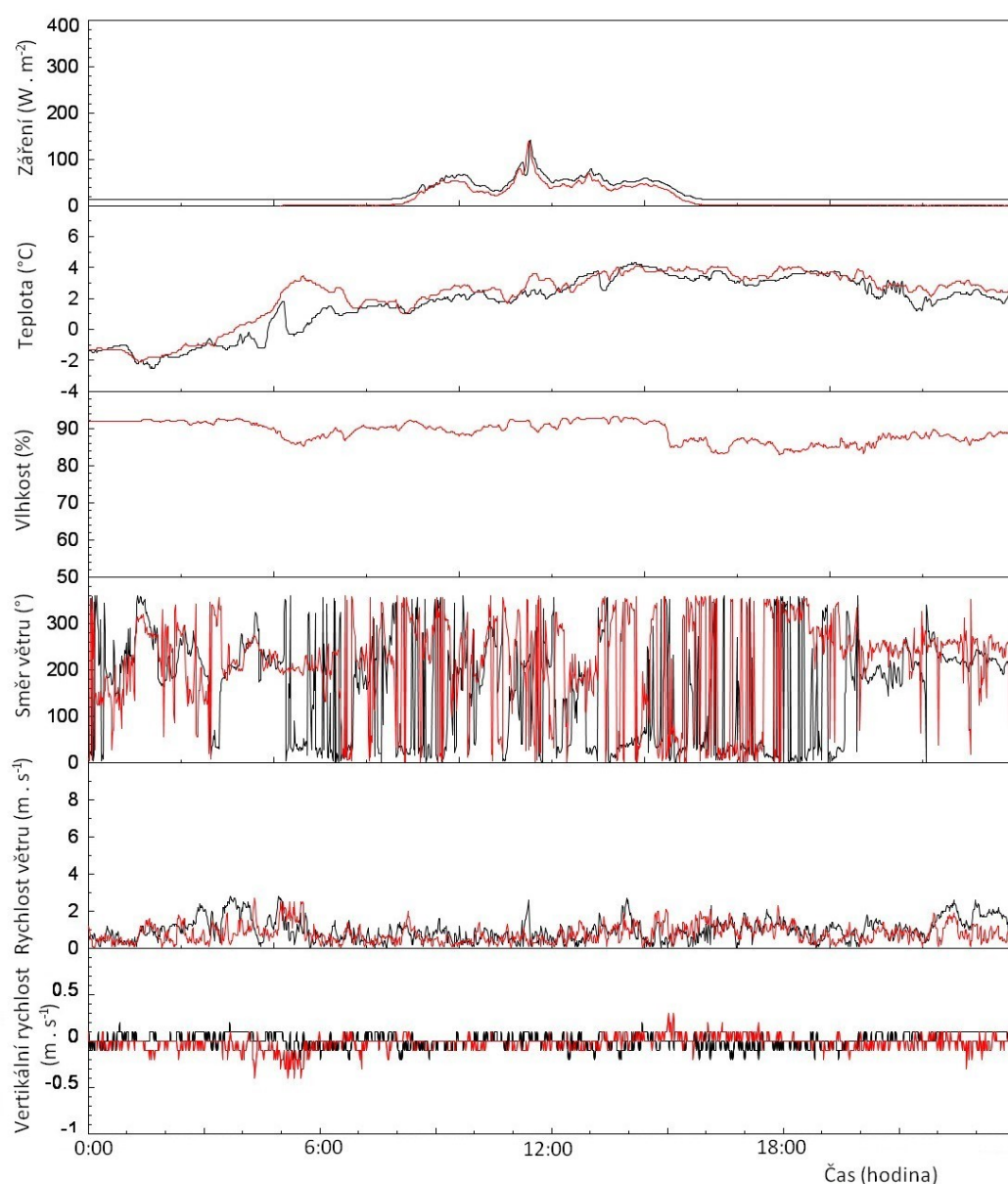
Dalším statistickým zpracováním souboru vertikálních letů bylo nalezení horního decilu v každém patře a vytvoření geometrického průměru z 10% nejvyšších hodnot. Toto zpracování proběhlo v MS Excel, grafické zobrazení i s proložením a vypočtením regresí proběhlo v programu CoPlot.

## 6 Výsledky

Ze čtyřdenního měření bylo nasbíráno několik milionů číselných hodnot, které byly vytrženy, upraveny a zpracovány do výsledné podoby.

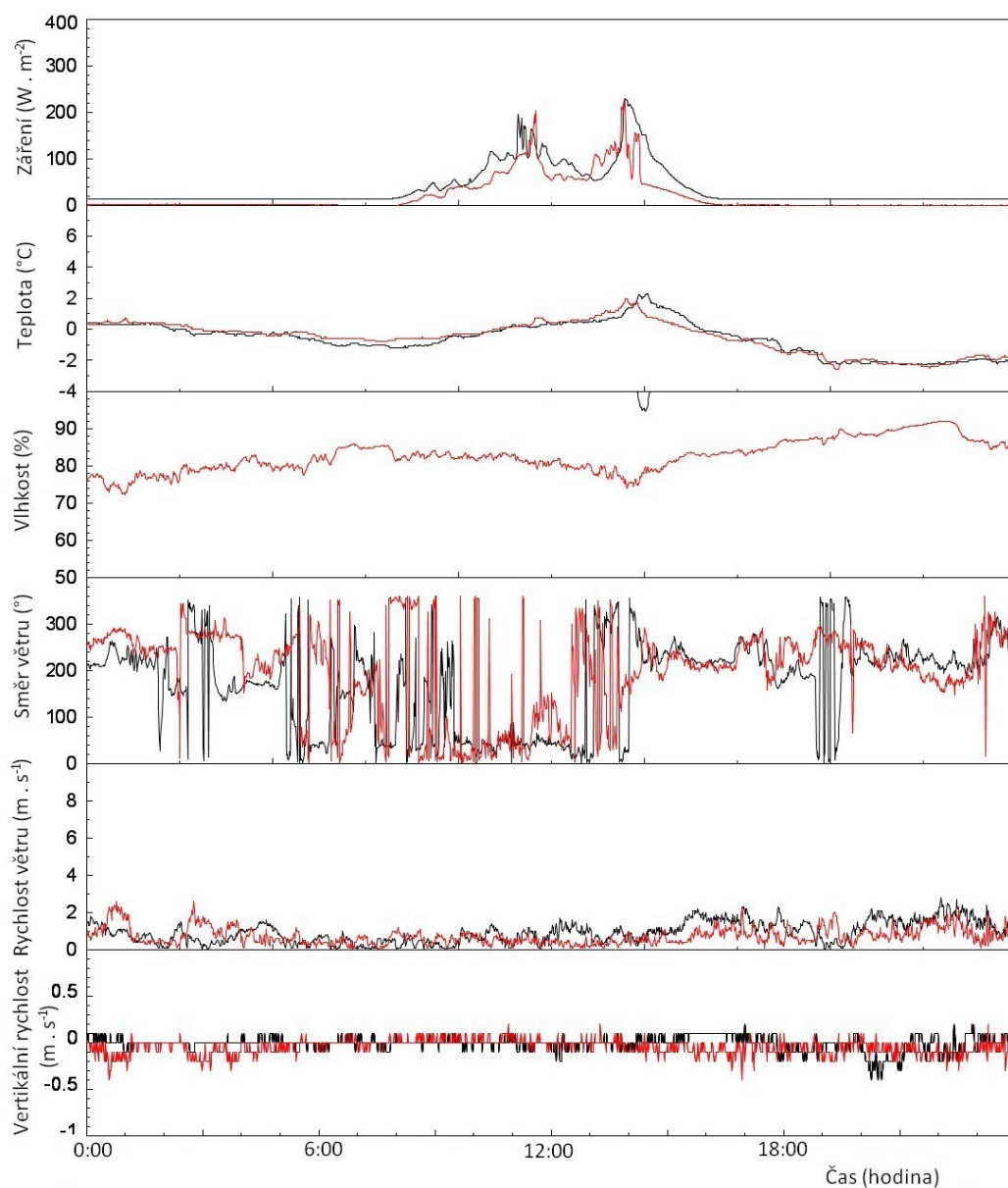
### 6.1 Meteorologické parametry

Z měření anemometry jsou pro každý let vytvořeny větrné růžice, které jsou přiloženy ke grafickému zpracování patřičných letů. Všechny sledované meteorologické parametry jsou uvedeny v následujících obrázcích a je možné je nahlédnout při prohlížení ostatních výsledků. Červeně je zobrazován anemometr A2 v západní části dolu, černě pak anemometr A1 v severovýchodní části dolu.



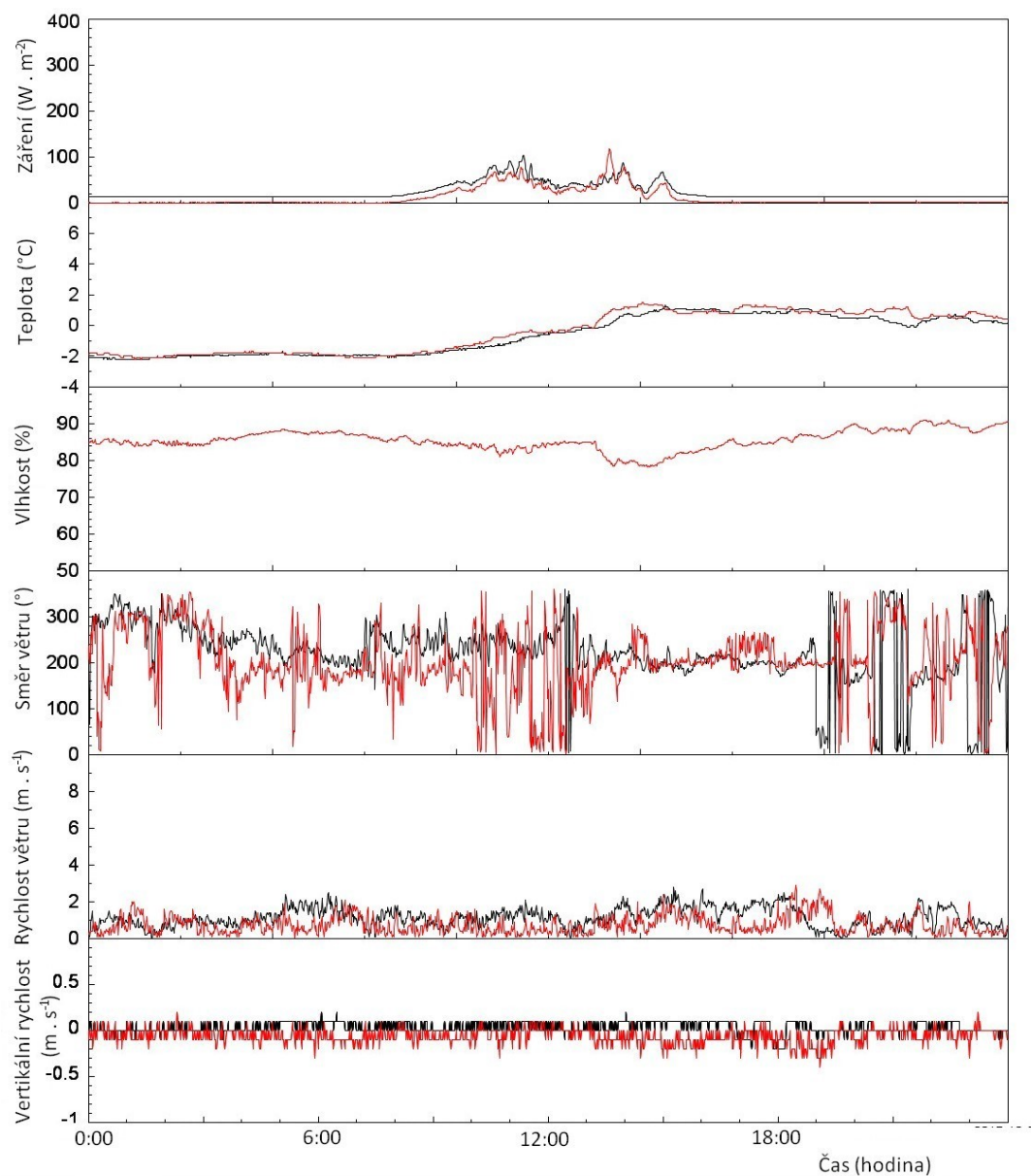
Obr. 24 Meteorologické parametry pro 11.12.2017



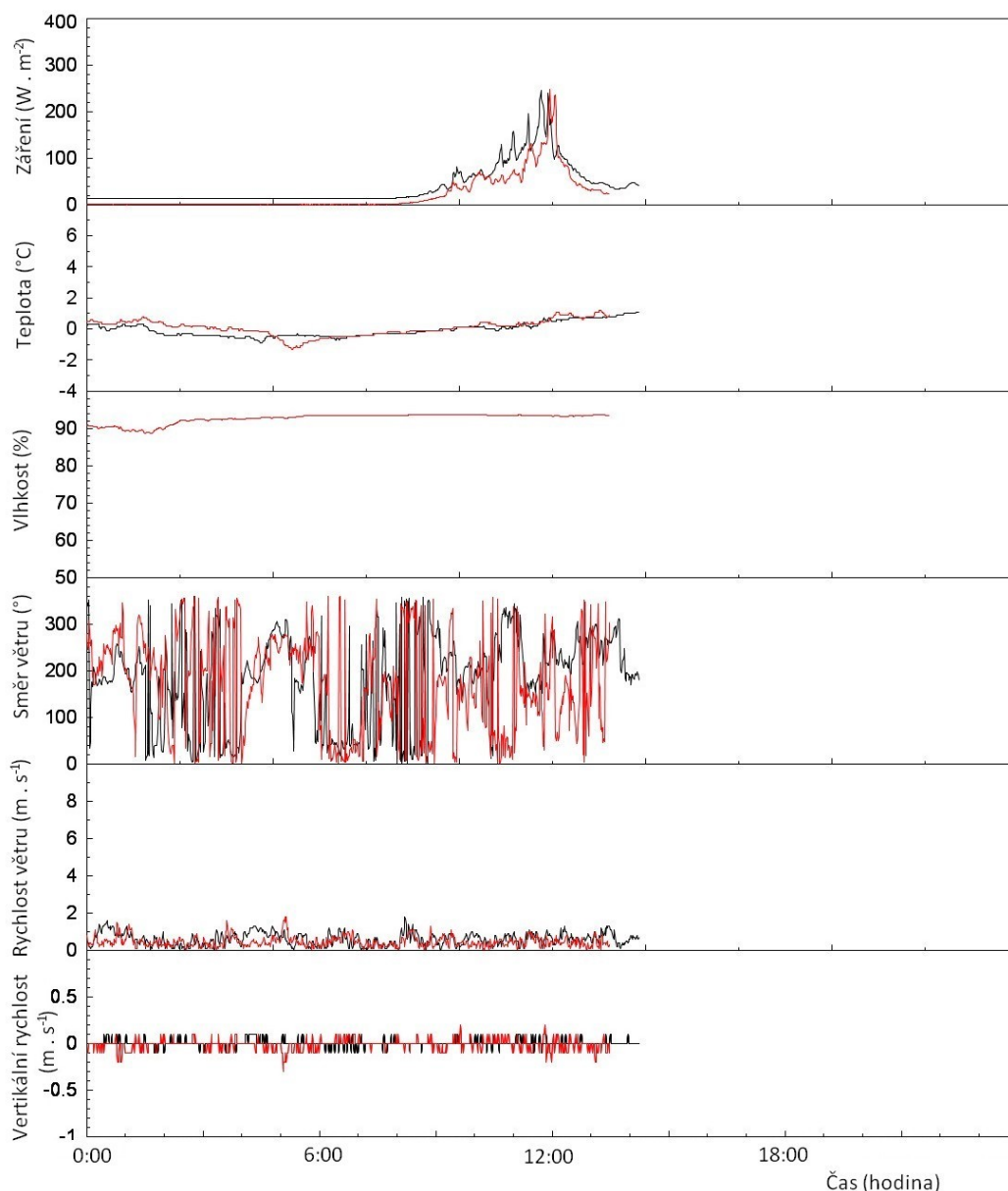


Obr. 25 Meteorologické parametry pro 18.12.2017





Obr. 26 Meteorologické parametry pro 19.12.2017



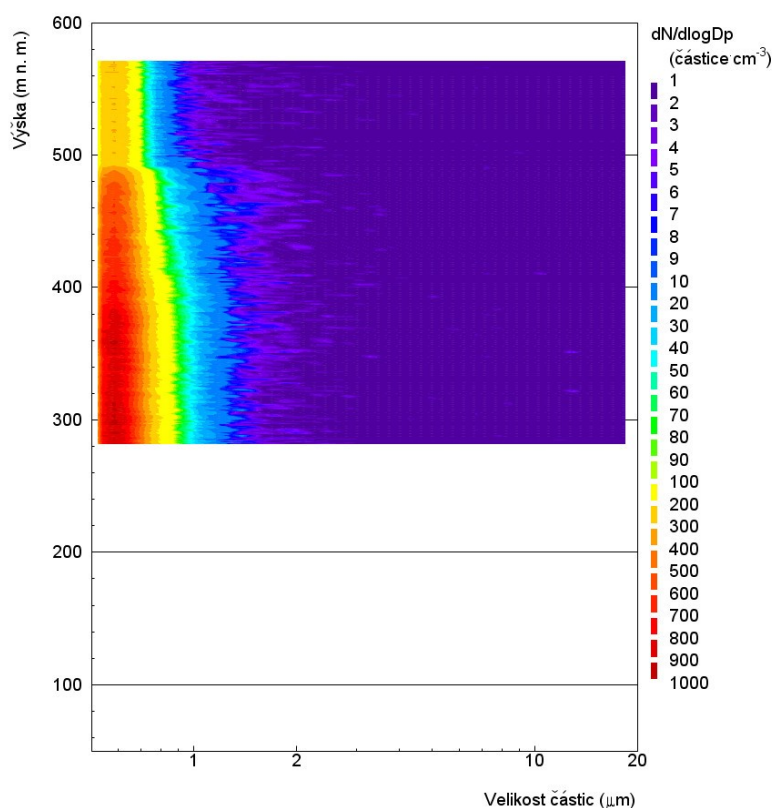
Obr. 27 Meteorologické parametry pro 20.12.2017

Meteorologické parametry slouží k interpretaci výsledků samotného měření koncentrací. Z grafů je ale také vidět, že červené a černé křivky v povětrnostních podmínkách nemají příliš podobné průběhy. Vypadá to tedy, že jáma neodvětrává na všech místech stejně, jak bylo předpokládáno. Anemometry se však nachází ve vyšších patrech dolu, takže nemohou poskytnout informaci o situaci uvnitř nižších dolů.

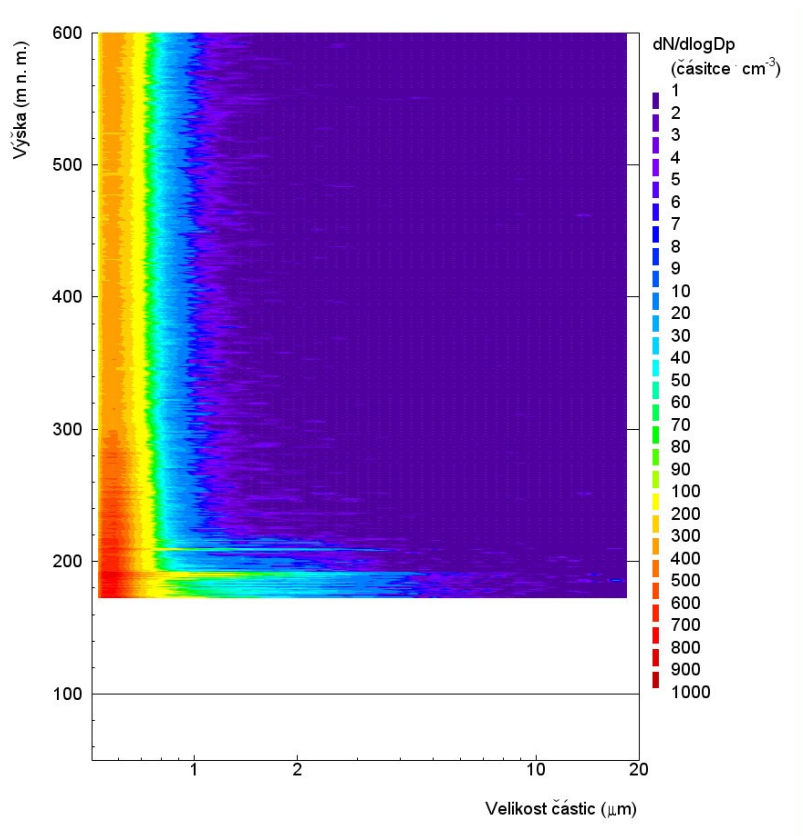
## 6.2 Experimentální charakteristika velikostní distribuce

Velikostní distribuce atmosférického aerosolu byla zjištěna pro horizontální lety a pro vybraná patra letů vertikálních. Předpokladem je, že důl emituje hrubé částice s maximem

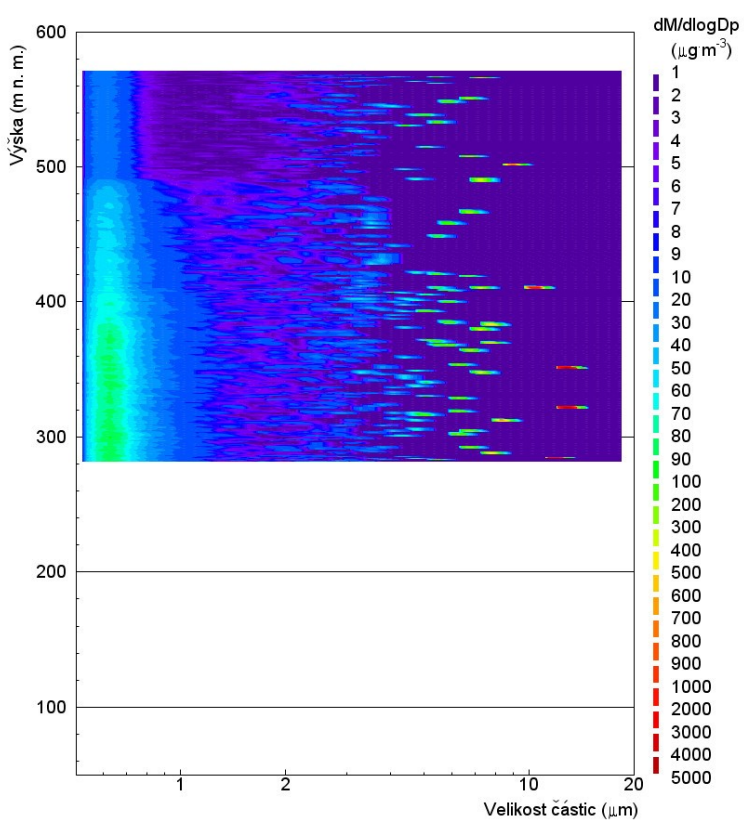
mezi 8-10  $\mu\text{m}$ . K ověření tohoto předpokladu byly provedeny dva šroubovicové lety. Jeden mezi dvěma rypadly a druhý nad anemometrem A2, v jehož bezprostřední blízkosti se rypadlo nenachází. Následující obrázky zobrazují nejdříve početní koncentraci obou šroubovic a poté koncentraci hmotnostní. Na ose y je nadmořská výška, ale další geografické údaje v grafu nejsou zahrnuty. Průměr šroubovic se pohybuje mezi 100 – 200 m.



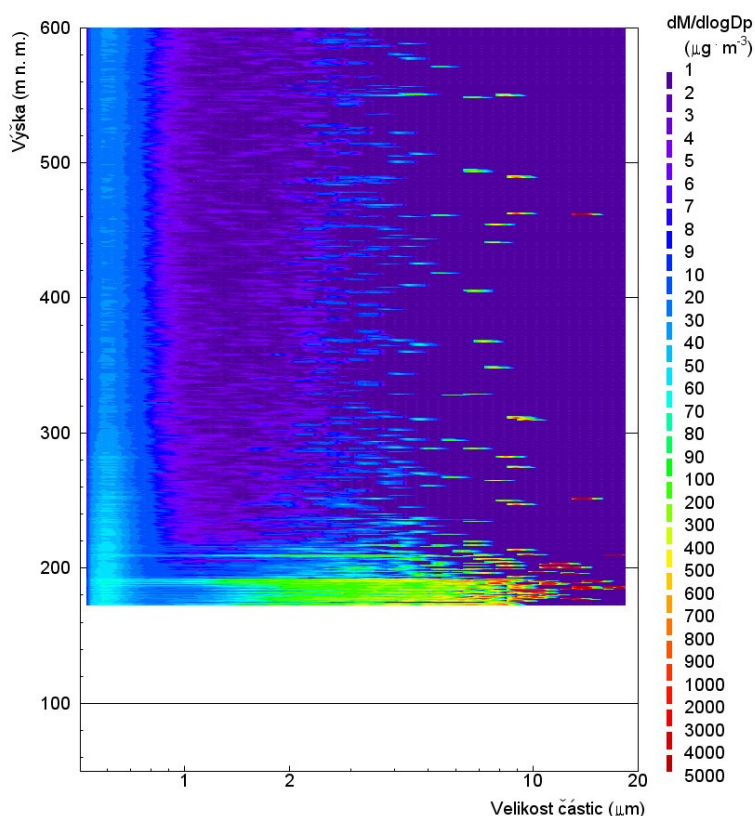
Obr. 28 Velikostní distribuce počtu částic atmosférického aerosolu při šroubovicovém letu nad anemometrem



Obr. 29 Velikostní distribuce počtu částic atmosférického aerosolu při šroubovicovém letu mezi rypadly



Obr. 30 Velikostní distribuce hmotnostní koncentrace atmosférického aerosolu při šroubovicovém letu nad anemometrem



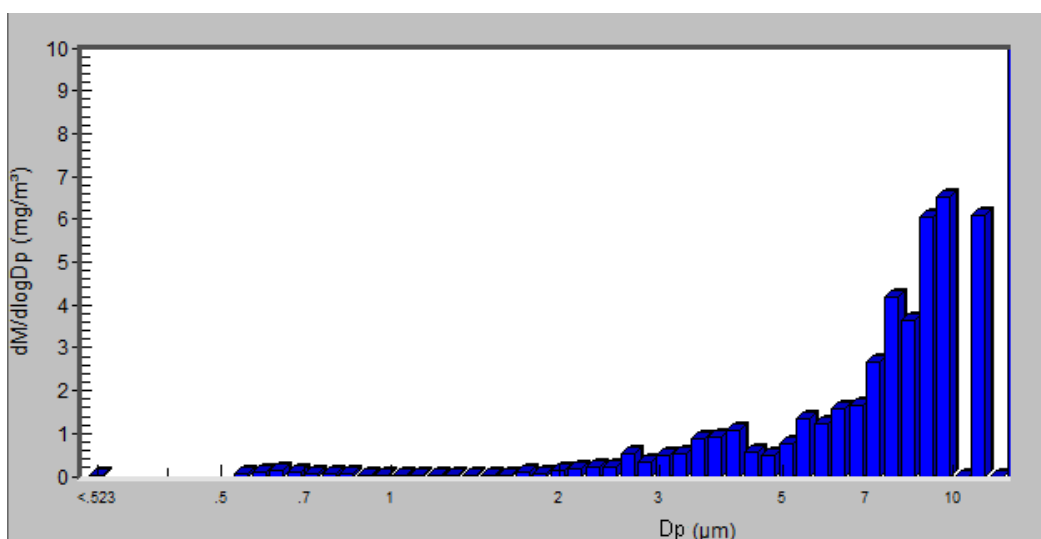
Obr. 31 Velikostní distribuce hmotnostní koncentrace atmosférického aerosolu při šroubovicovém letu mezi rypadly

Jak můžeme vidět, početní koncentrace mají podobný trend. Nad anemometrem je vyšší koncentrace jemných částic, což si vysvětlují možným vyšším vlivem okolních zdrojů těchto částic, jelikož se anemometr nachází ve vyšší výšce (i z toho důvodu chybí spodní část grafu ve výšce přibližně od 180 do 280 m n. m.). Tento úbytek částic je vidět i na hmotnostním grafu, kde je naopak u grafu mezi rypadly patrná vyšší koncentrace od přibližně 2  $\mu\text{m}$  a nejvyšší koncentrace pak kolem 10  $\mu\text{m}$ . I díky vyšší koncentraci hrubých částic by v dole mohlo být méně těch jemných díky možnosti jemných částic navázat se na větší. Navíc se koncentrace jemných částic s výškou tolik nemění jako u šroubovice nad anemometrem. Naopak zvýšená koncentrace hrubých částic směrem do výšky klesá významně rychleji, jelikož větší částice sedimentují rychleji (Patra et al., 2015).

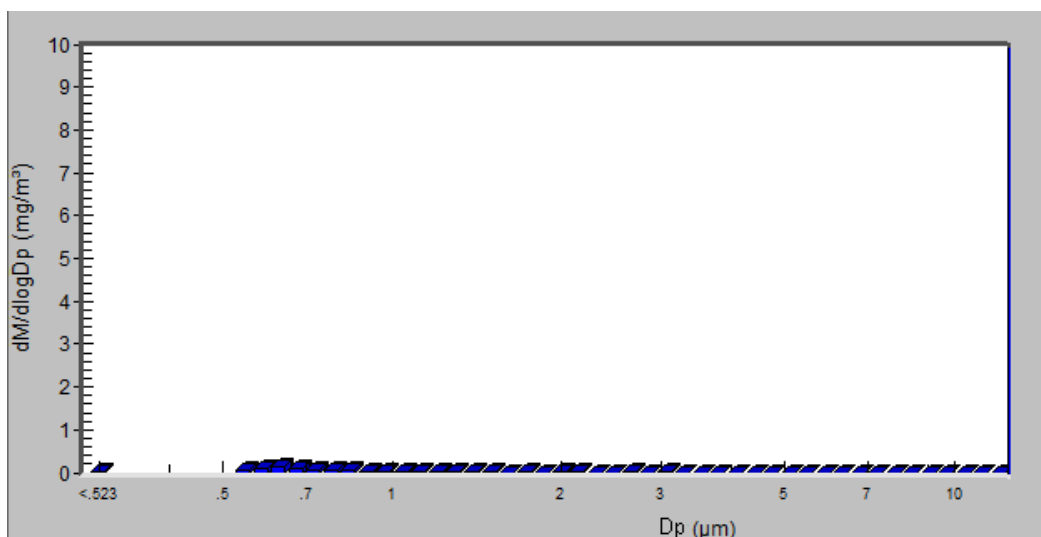
Pokud porovnáme ale obr. 29 a obr. 31 tedy hmotnostní a početní koncentraci při šroubovicovém letu mezi rypadly, v grafu N rozhodně není tolik patrný nárůst částic hrubého módu jako je vidět v grafu hmotnostní koncentrace.

Podobné srovnání ukazují i následující obrázky, které jsou pořízeny přímo z programu AIM a zobrazují distribuci jednoho konkrétního naměřeného vzorku – tedy data pořízená

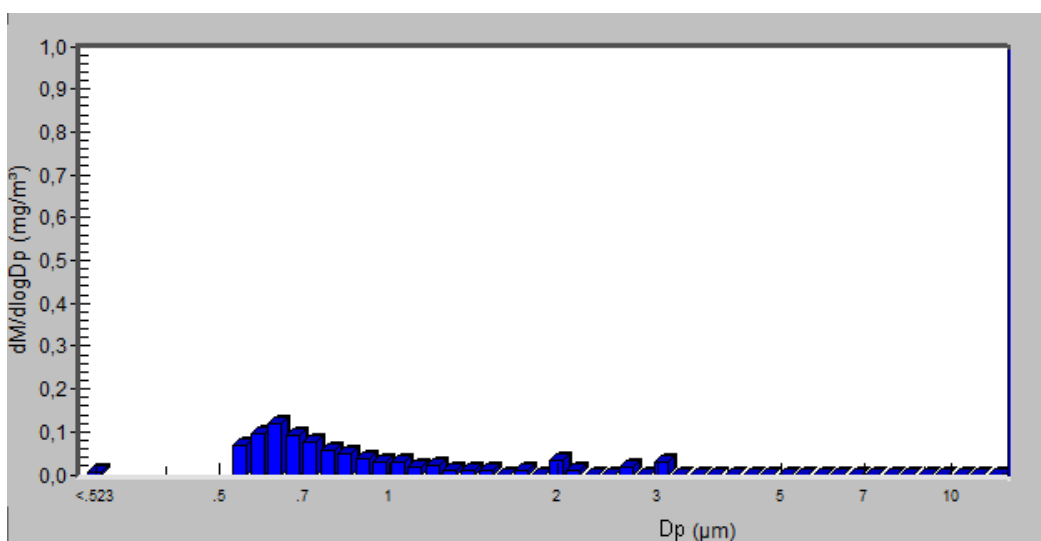
za 1s. Data byla vybrána z letu č. 2 ve dne 19.12. Obr. pochází z místa letu v blízkosti rypadla, obr. pak z místa vzdáleného od rypadla.



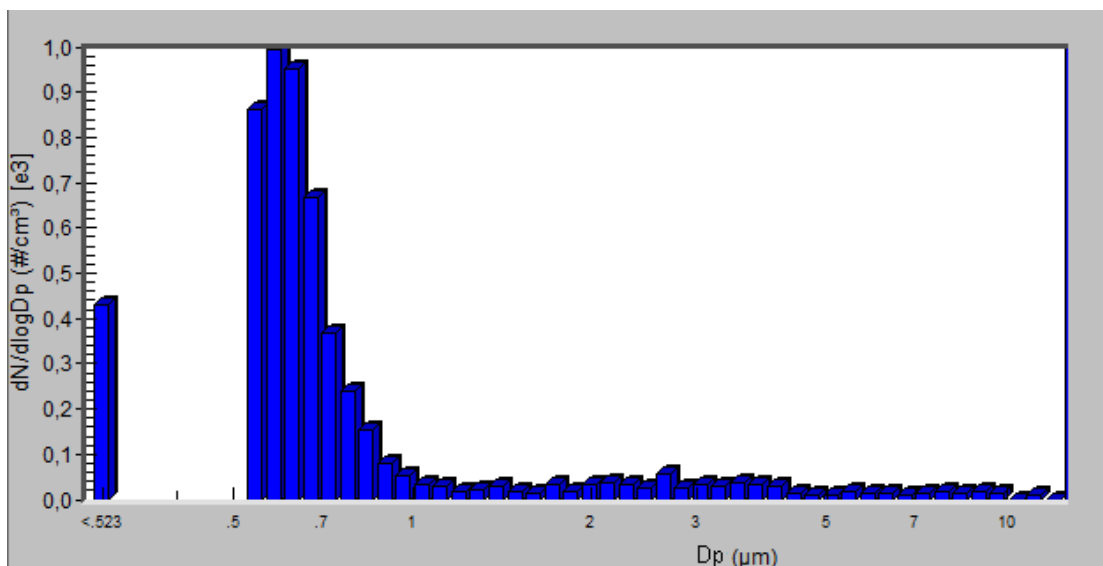
Obr. 32 Velikostní distribuce hmotnosti částic v blízkosti rypadla



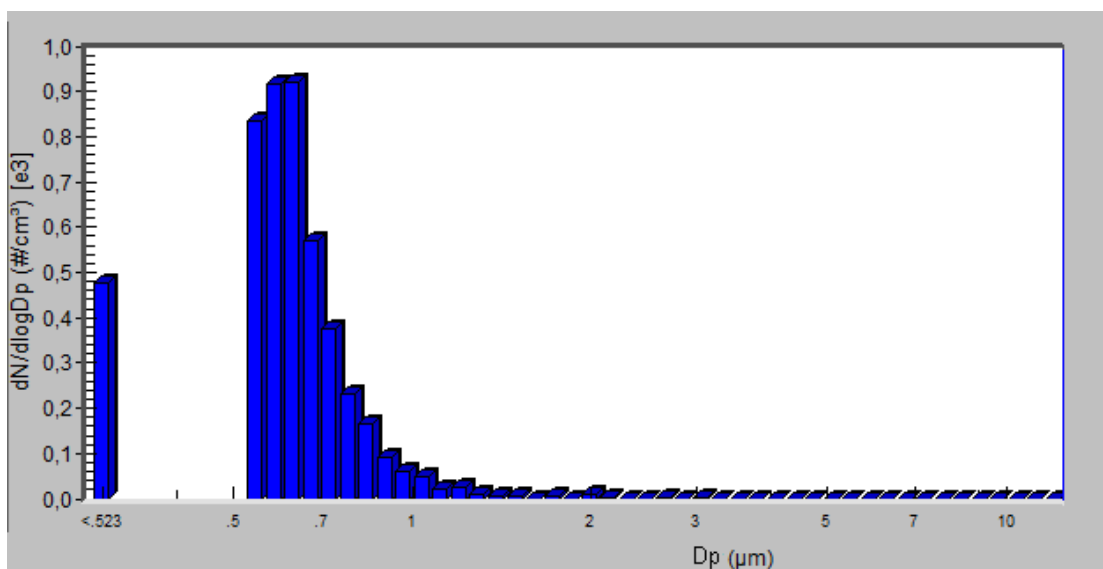
Obr. 33 Velikostní distribuce hmotnosti částic mimo rypadlo



Obr.34 Velikostní distribuce hmotnosti částic mimo rypadlo (snížená škála dM/dlogDp)



Obr. 35 Velikostní distribuce počtu částic v blízkosti rypadla



Obr. 36 Velikostní distribuce hmotnosti částic v blízkosti rypadla

Můžeme opět vidět výrazně zvýšenou hmotnostní koncentraci hrubých částic atmosférického aerosolu. Obr. 34 je zařazen pro zviditelnění distribuce částic mimo dosah rypadla v obr. 33, které v této škále nejsou vidět. Na početních koncentracích jednoho a druhého vzorku však není patrný výrazný rozdíl.

Emise hrubých částic se tedy na početní koncentraci neodráží takovou měrou jako v koncentraci hmotnostní. Proto bude v dalším textu prezentována jako klíčová proměnná koncentrace hmotnostní s občasným srovnáním s koncentrací početní.



### 6.3 Velikostní distribuce vertikálních letů

Pro všechny vertikální i horizontální lety byly vytvořeny distribuce obdobné grafům z AIM. Pro horizontální lety jsou grafy přiložené k ostatnímu zpracování v kapitole 6.5 a mají osu y upravenou pro lepší zobrazení distribucí v odlétaných hladinách. K velikostní distribuci bylo použito normalizovaných hodnot koncentrací –  $dM/d\log D_p$  a  $dN/d\log D_p$ .

Vertikální distribuce částic nebyla zjištěna pro všechny odlétané výškové hladiny, ale byly zvoleny hladiny po sto metrech: 185, 285, 385, 485 m n. m. K nim pak byly přidány nejnižší a nejvyšší dosažené hladiny daného letu, pokud jimi nebyla některá ze čtyř uvedených hladin, nejčastěji 110 a 560 m n. m. Cílem tohoto zobrazení je ukázat, jak se s výškou v jednotlivých letech mění velikostní distribuce částic atmosférického aerosolu v prostoru těžební jámy. Ne všechny lety se dostaly na všechny z těchto hladin, proto v některých případech distribuce z těchto hladin chybí. Jindy také byly odletěny jiné hladiny (zejména ve vyšších vrstvách), než tyto zvolené, např. hladina 460 místo 485. Všechny hladiny jsou tedy označeny a barevně odlišeny.

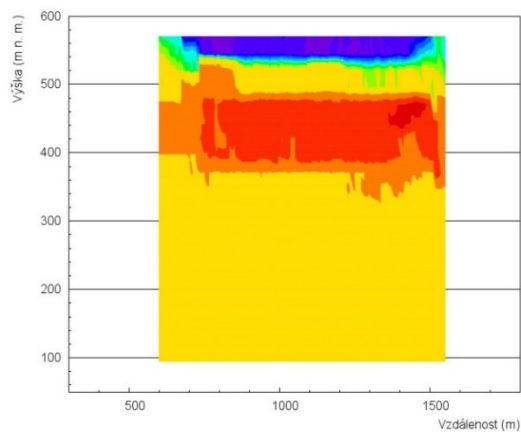
K distribučním grafům je pak v případě hmotnostní koncentrace přidáno MMD (velikost částice o mediánu hmotnosti) a CMD (velikost částice o mediánu četnosti) u koncentrace početní. Početní koncentrace byla vytvořena pouze pro dva lety, jelikož se oproti distribuci hmotnostní příliš nemění a vždy v ní dominují nižší velikosti částic. Pro lepší orientaci jsou osy početní koncentrace od hmotnostních barevně odlišeny.

Všechny grafy vertikální velikostní distribuce jsou pro přehlednost uloženy ve vyjímatelné Příloze 2 vložené v kapse na zadních deskách.

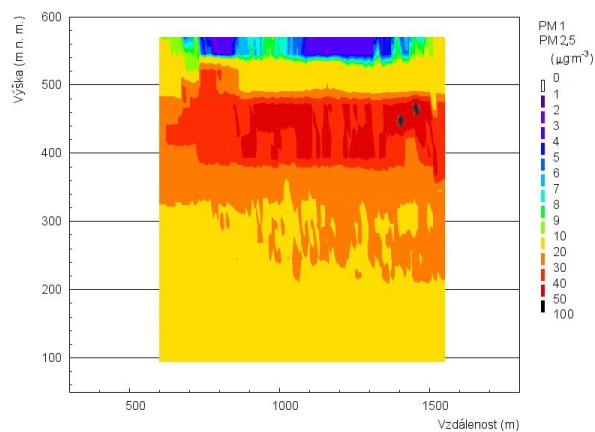
### 6.4 Koncentrace atmosférického aerosolu uvnitř těžebního prostoru ve vertikále

Zatímco u distribučních grafů byly použity hodnoty normalizované na velikost kanálu, nyní budou zobrazovány výsledky prosté koncentrace M a N zasazené do prostoru dolu. Pro zobrazení hmotnostní koncentrace byly vybrány hodnoty PM<sub>1</sub>, PM<sub>10</sub> a Coarse. Další obvykle zobrazovaná koncentrace PM<sub>2,5</sub> je zobrazena pouze na obr. 38 jako příklad pro srovnání PM<sub>1</sub> a PM<sub>2,5</sub>, které se od sebe významným způsobem neliší.



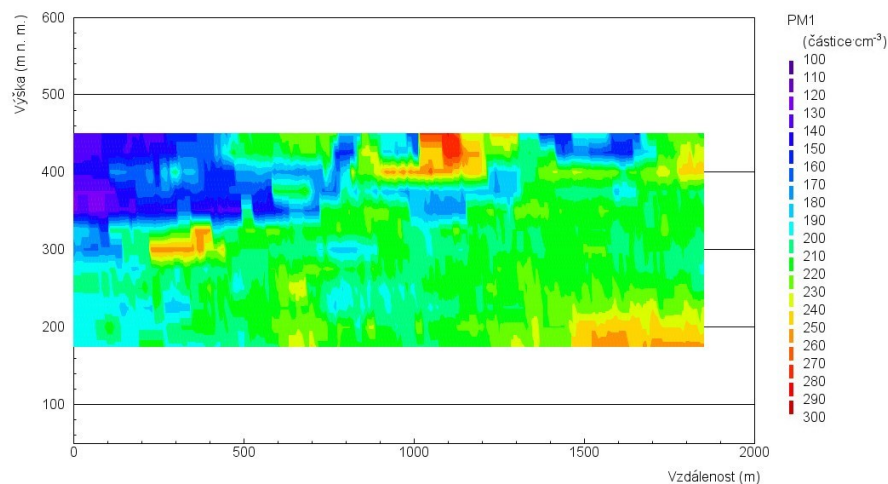


Obr. 37 Hmotnostní koncentrace PM1  
v prostoru dolu

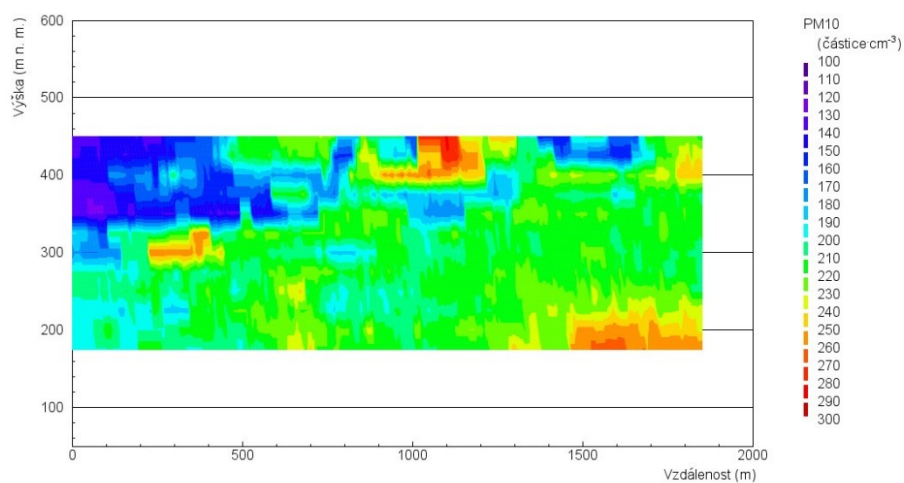


Obr. 38 Hmotnostní koncentrace PM2,5  
v prostoru dolu

U početní koncentrace se od sebe příliš neliší dokonce ani frakce PM1 a PM10.



Obr. 39 Početní koncentrace frakce PM1 v prostoru dolu



Obr. 40 Početní koncentrace frakce PM10 v prostoru dolu

Většinu počtu částic tedy tvoří frakce PM<sub>1</sub>. Pozornost této práce je ale zaměřena spíše na hrubý aerosol, proto jsou z početní koncentrace graficky zobrazené jen ve frakci Coarse.

Obrázky grafů jsou doplněny o rypadla, která se nacházela na trase letu. Rypadla jsou velikostně rozlišena (2 velikosti) podle vzdálenosti od trasy vzducholodi. Rypadla s x-ovými (LO) S-JTSK souřadnicemi blízkými trase letu (vzducholod' letí přibližně nad nimi) jsou větší, menší rypadla mají pak x-ovou souřadnici vzdálenější a nepředpokládám u nich tak velký vliv. Nacházejí se navíc ve vyšším patře. Přesnou polohu rypadel je možno nahlédnout v tab. v kapitole 5.2 Metodika - Technologie v dolu.

Grafy jsou dále doplněny o větrné růžice obou anemometrů, které mají klasické rozložení směrů do světových stran (na rozdíl od grafu, který je orientován do výšky a severojižně). Anemometry jsou umístěny nad sebou podle umístění v dolu - nahoře A1, dole A2. Růžice se nachází pouze u grafů hmotnostní koncentrace a jsou stejné pro grafy početní koncentrace patřičných letů. Větrné růžice z letu 20.12. vychází pouze z dvanácti vzorků, jelikož let byl krátký, a proto se směry v rámci růžice hodně mění.

Pro lepší přehlednost jsou všechny grafy umístěny ve vyjímatelné Příloze 3 vložené v kapse na zadních deskách. Legenda k větrným růžicím se nachází v následující kapitole (6.5).

## 6.5 Koncentrace atmosférického aerosolu a jeho distribuce uvnitř těžebního prostoru v horizontále

Horizontální lety se létaly základně ve dvou výškách, v letu 11.12. č 2 je přidán kousek letu ve vyšší hladině. Tento let je vyznačen červenými šipkami v obrázku pro Coarse. Informace o výškové hladině je (společně s MMD) uvedená v boxu u grafu velikostní distribuce, která byla vytvořena pro každý let. Koncentrace jsou vloženy do mapového podkladu na základě souřadnic ze vzducholodi. Na obrázcích jsou dále vyznačena rypadla a anemometry. V horizontále jsou zobrazeny koncentrace pouze hmotnostní a jsou opět doplněny větrnými růžicemi tentokrát vedle sebe, taktéž dle umístění v dolu (vlevo anemometr A2, vpravo A1). Směry v tomto případě odpovídají světovým stranám na mapě.

## Legenda

### PM1 ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )

- 0 - 1
- 1 - 2
- 2 - 3
- 3 - 4
- 4 - 5
- 5 - 6
- 6 - 7
- 7 - 8
- 8 - 9
- 9 - 10
- 10 - 20
- 20 - 30
- 30 - 40
- 40 - 50
- 50 - 100



Anemometry



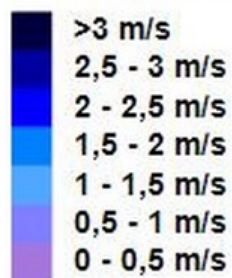
Velkostroje

### PM10 ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )

### Coarse ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )

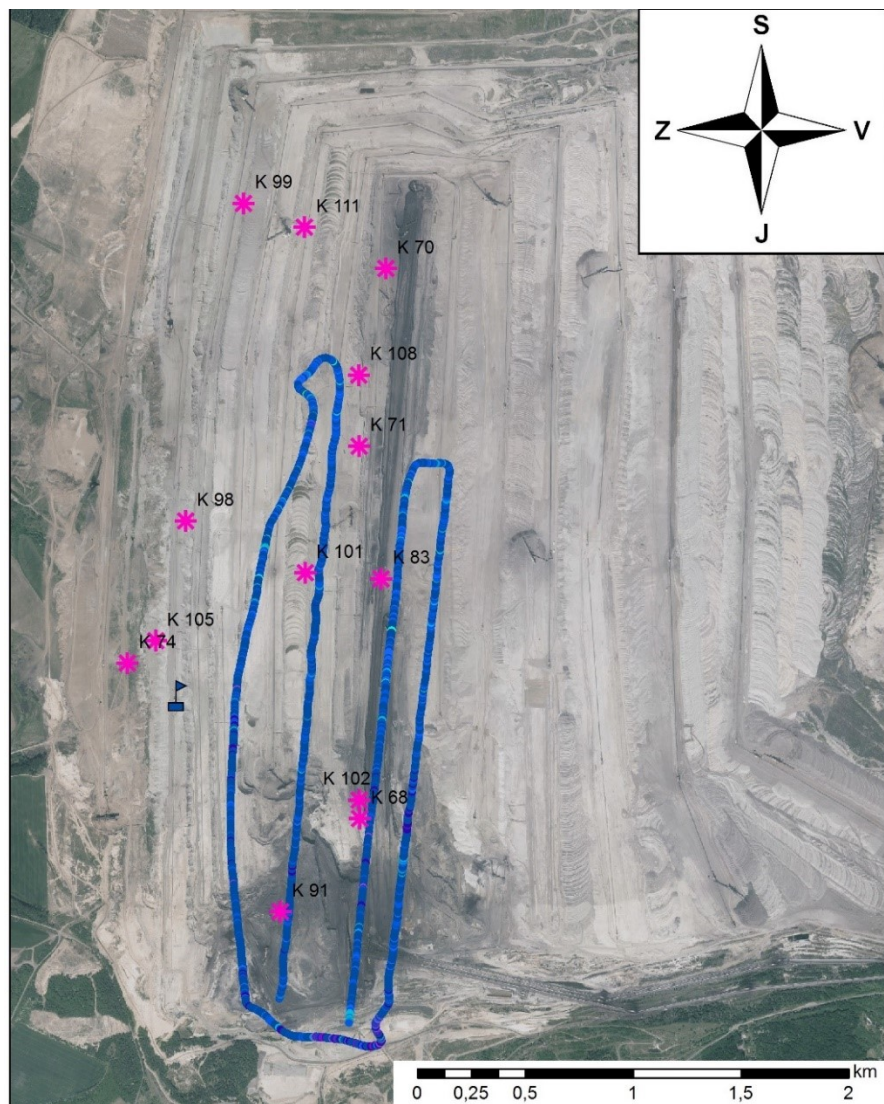
- 0 - 5
- 5 - 6
- 6 - 7
- 7 - 8
- 8 - 9
- 9 - 10
- 10 - 20
- 20 - 30
- 30 - 40
- 40 - 50
- 50 - 60
- 60 - 70
- 70 - 80
- 80 - 90
- 90 - 100
- 100 - 200
- 200 - 300
- 300 - 400
- 400 - 500
- 500 - 600
- 600 - 700
- 700 - 800
- 800 - 900
- 900 - 1000
- 1000 - 2000

### Rychlost větru

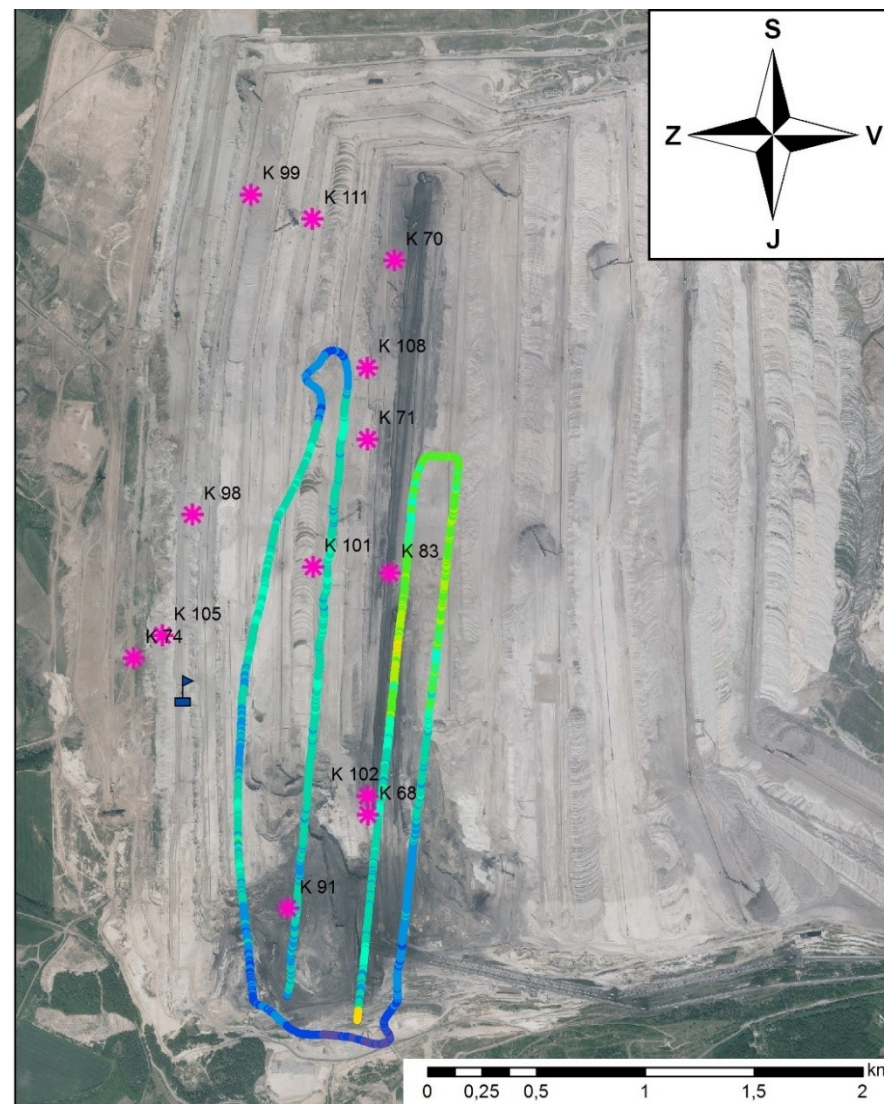


Obr. 41 Legenda k mapovým zobrazením koncentrací PM1, PM10 a Coarse horizontálních letů a rychlosti větru ve větrných růžicích



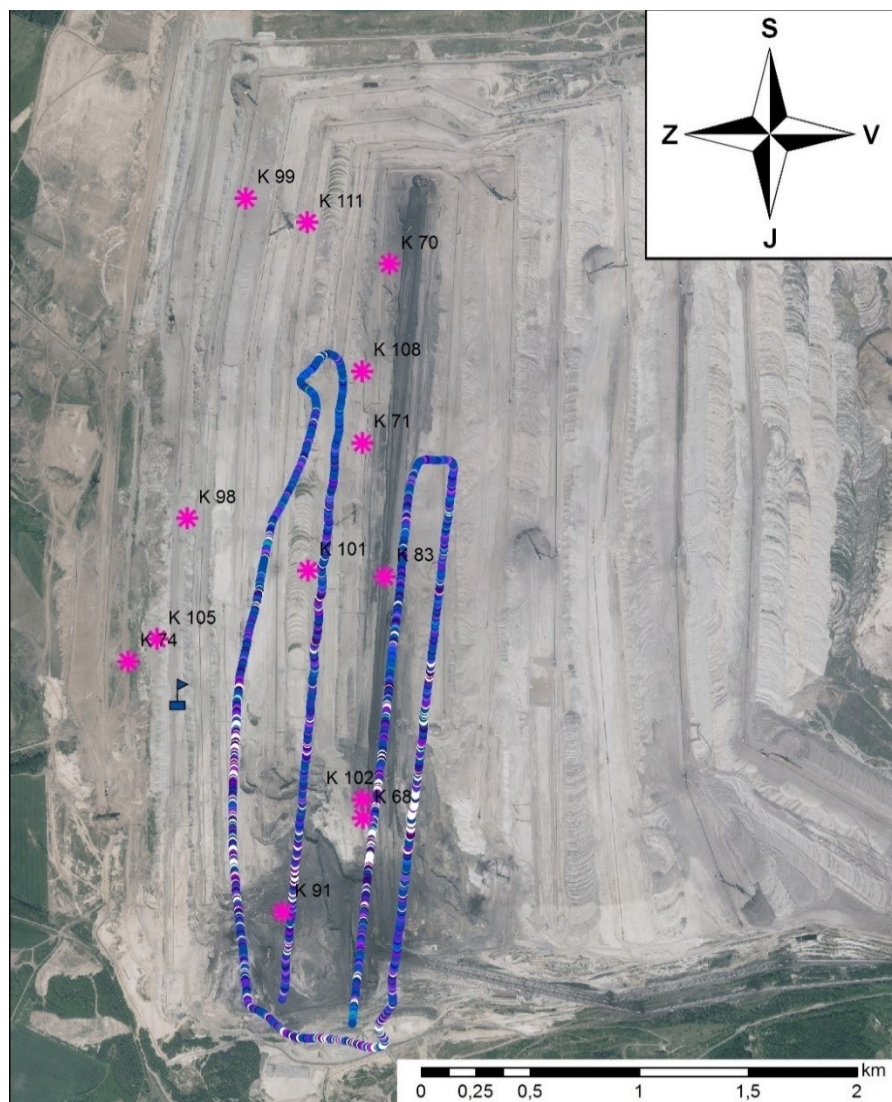


Obr. 42 Hmotnostní koncentrace PM10 v letu č. 1 11.12.2017  
(část A: 10:06-10:39)

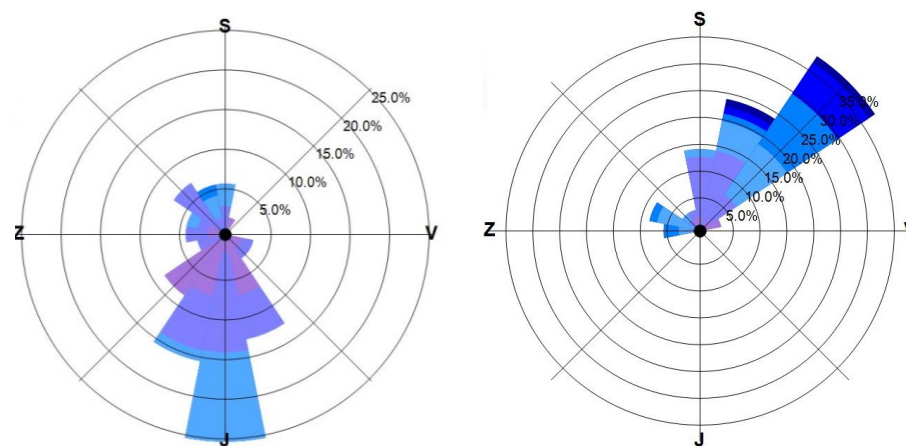


Obr. 43 Hmotnostní koncentrace PM1 v letu č. 1 11.12.2017  
(část A: 10:06-10:39)

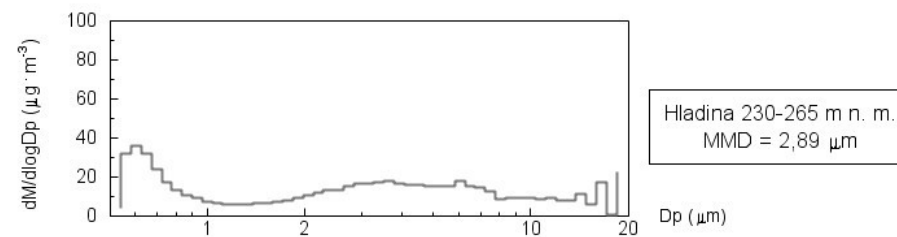




Obr. 44 Hmotnostní koncentrace Coarse v letu č. 1 11.12.2017  
(část A: 10:06-10:39)

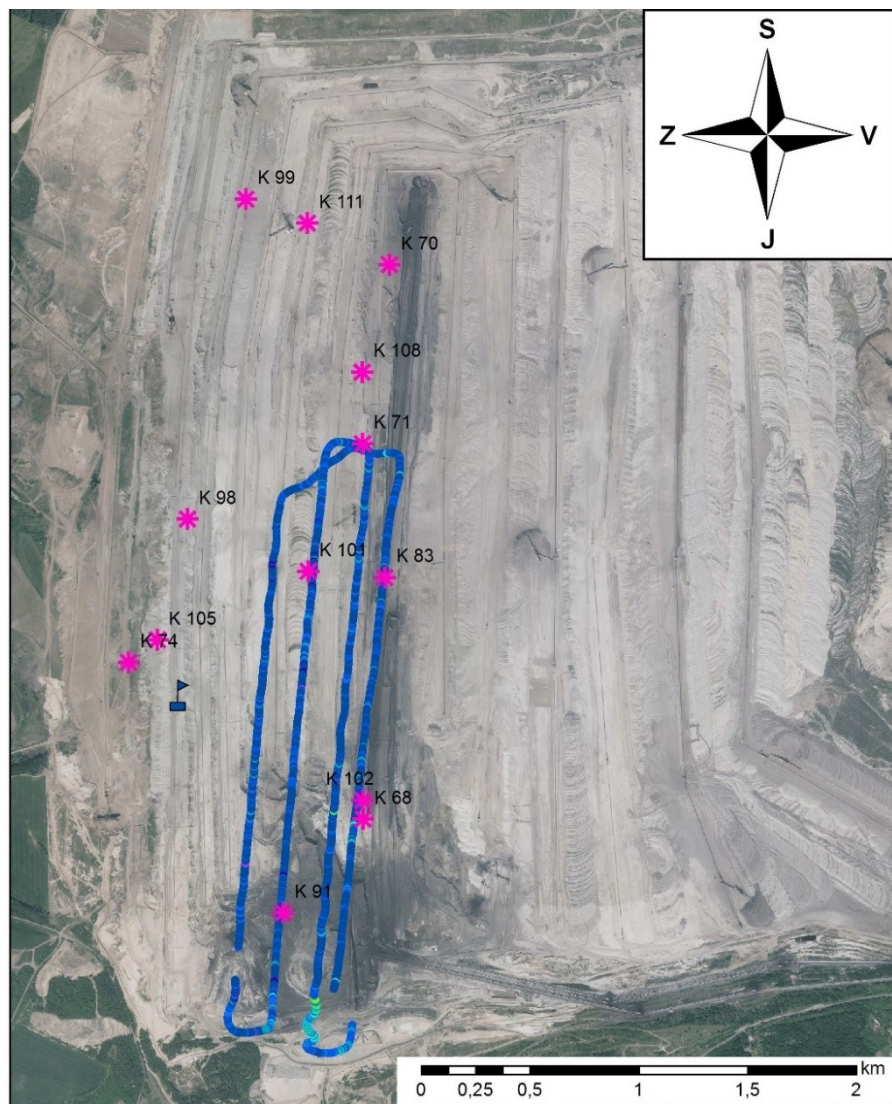


Obr. 45 Větrné růžice k letu č. 1 11.12. 2017

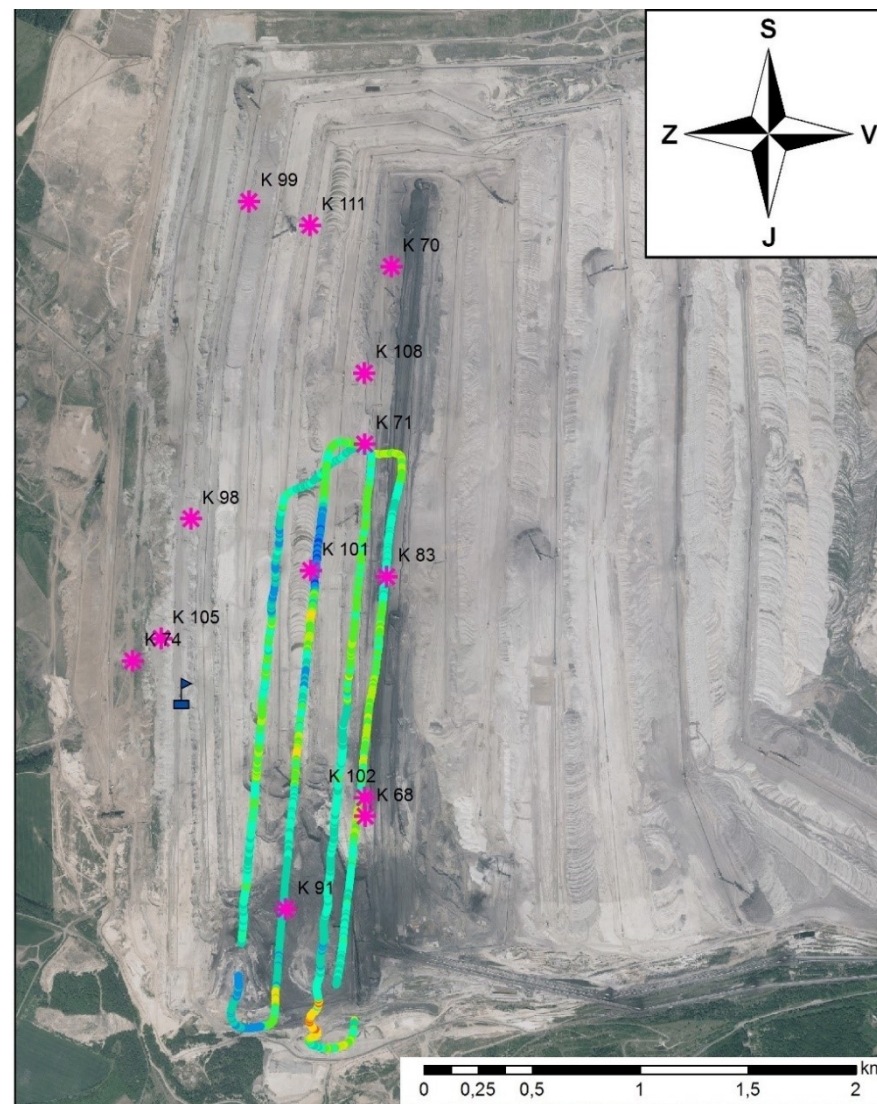


Obr. 46 Velikostní distribuce hmotnosti aerosolu při letu č. 1 11.12. 2017, část A



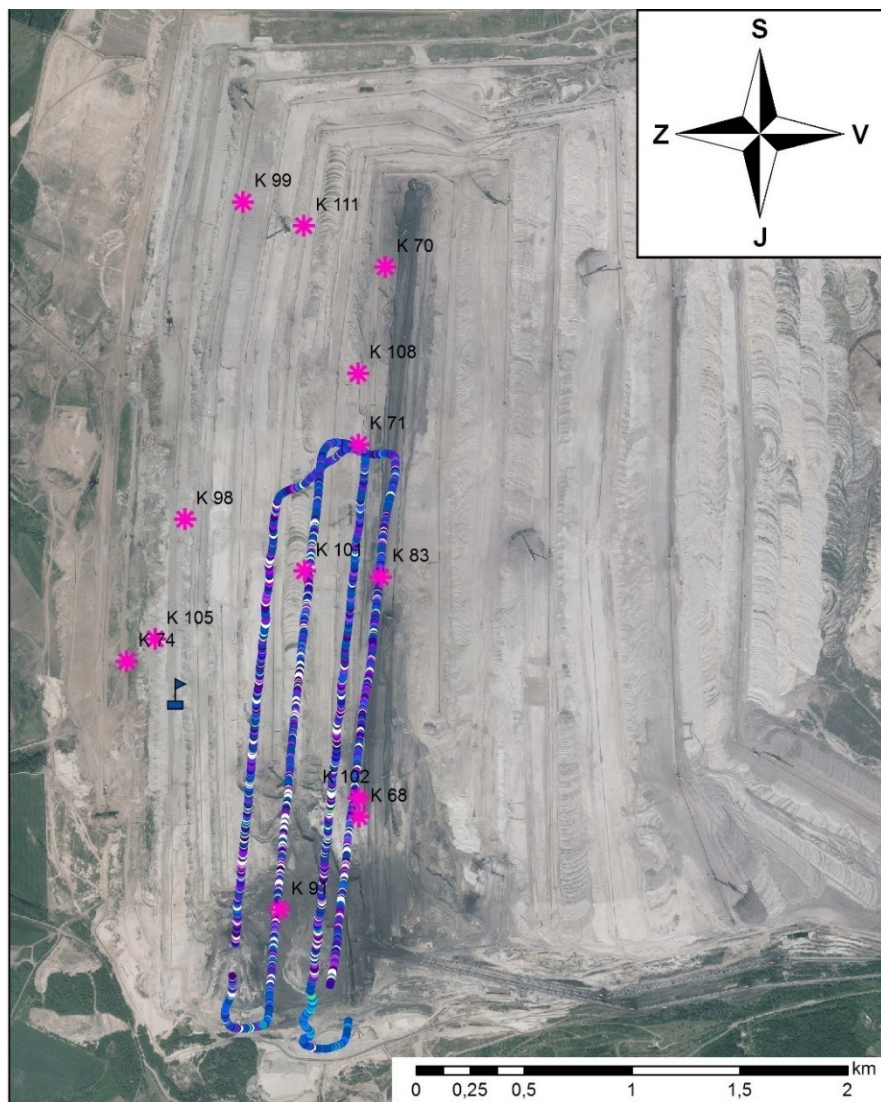


Obr. 47 Hmotnostní koncentrace PM10 v letu č. 1 11.12.2017  
(část B: 10:39-11:55)

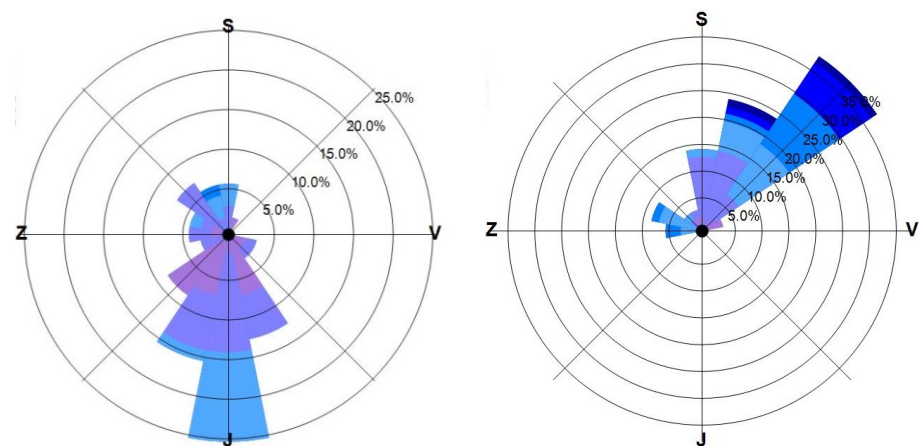


Obr. 48 Hmotnostní koncentrace PM1 v letu č. 1 11.12.2017  
(část B: 10:39-11:55)

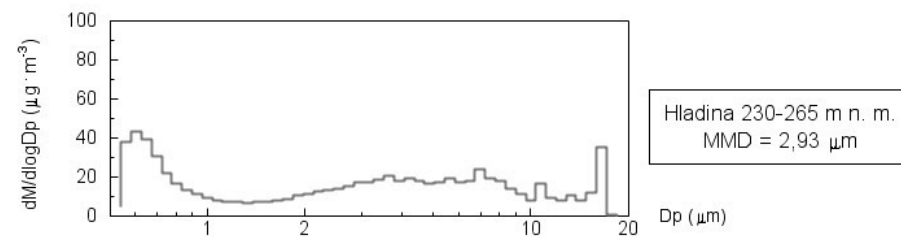




Obr. 49 Hmotnostní koncentrace Coarse v letu č. 1 11.12.2017  
(část B: 10:39-11:55)

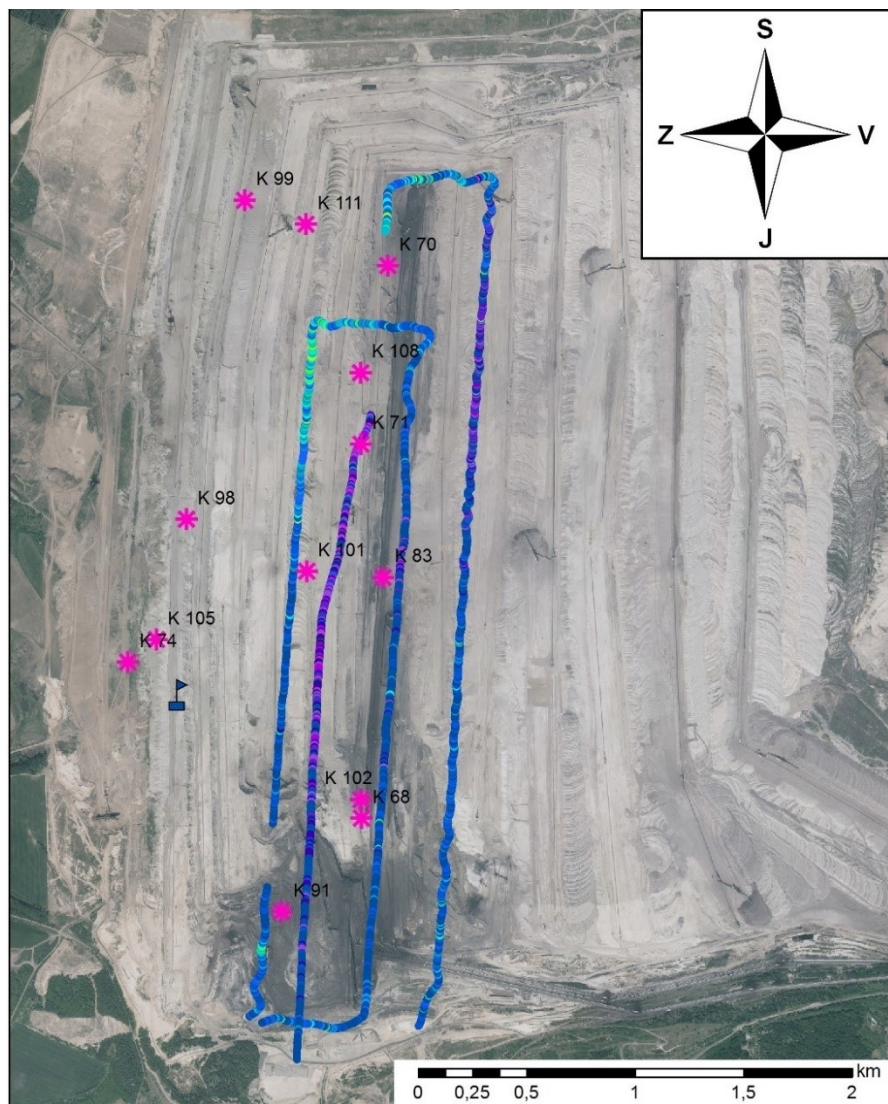


Obr. 45 Větrné růžice k letu č. 1 11.12. 2017 (stejně jako v předchozí části letu – části A)

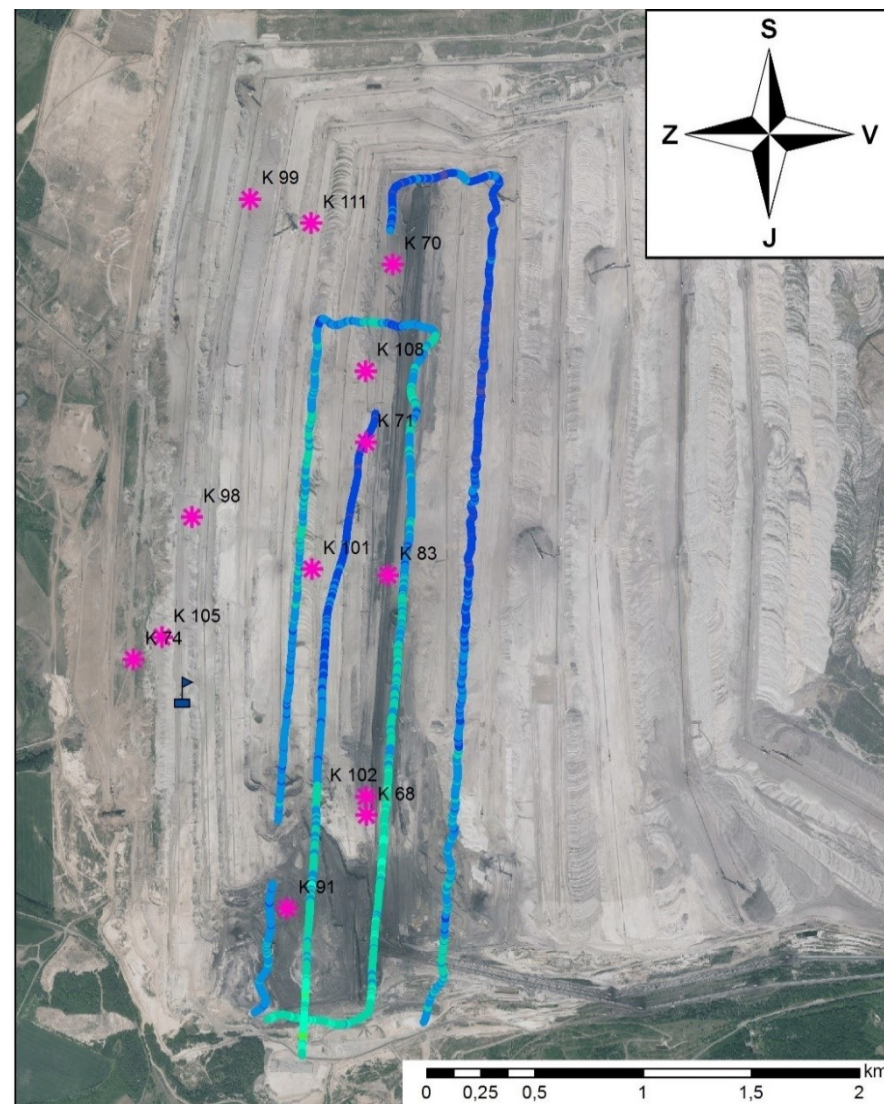


Obr. 50 Velikostní distribuce hmotnosti aerosolu při letu č. 1 11.12. 2017, část B



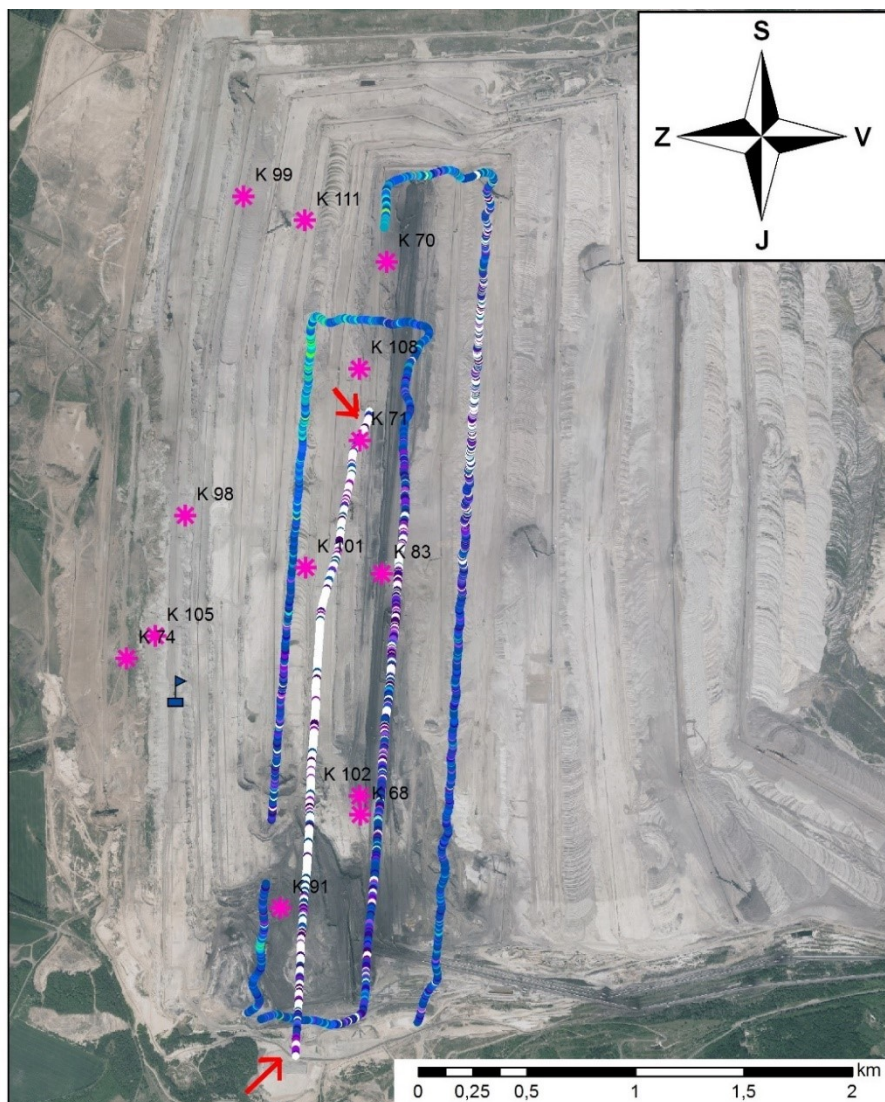


Obr. 51 Hmotnostní koncentrace PM10 v letu č. 2 11.12.2017

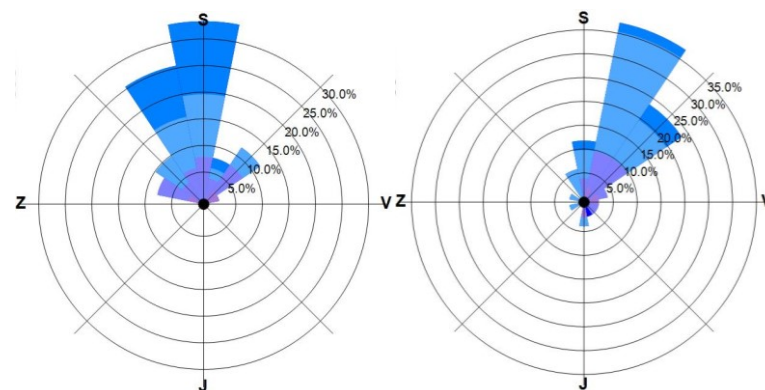


Obr. 52 Hmotnostní koncentrace PM1 v letu č. 2 11.12.2017

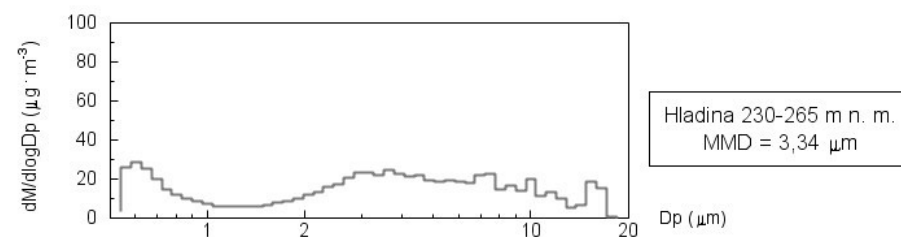




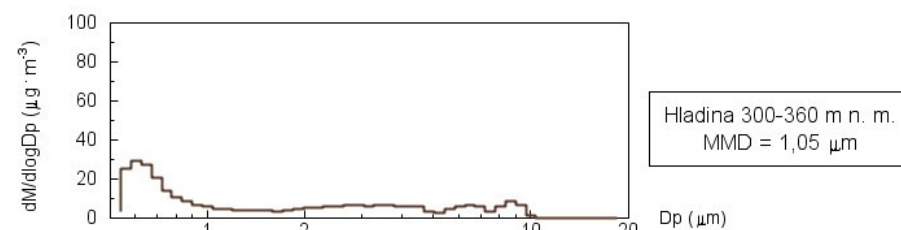
Obr. 53 Hmotnostní koncentrace Coarse v letu č. 2 11.12.2017  
Červené šipky vyznačují část letu, která se odehrála ve výšce nad 300m.



Obr. 54 Větrné růžice k letu č. 2 11.12. 2017

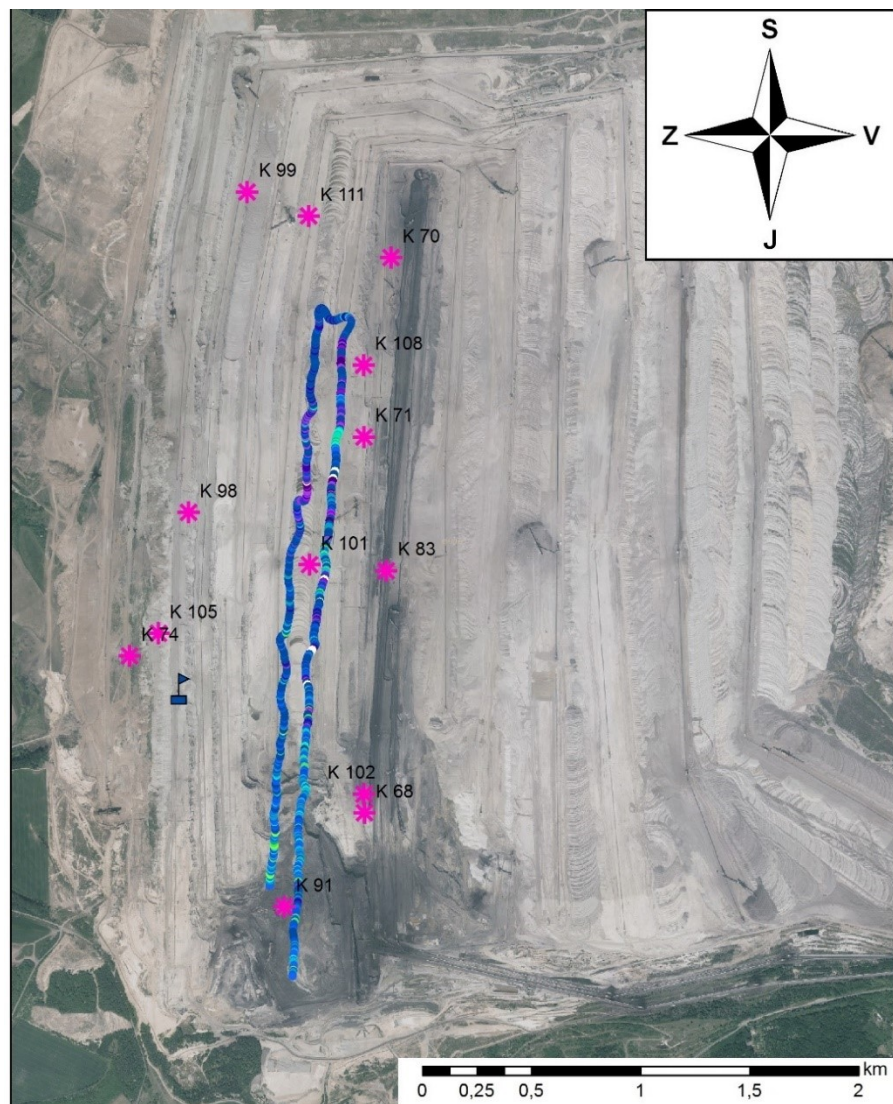


Obr. 55 Velikostní distribuce hmotnosti aerosolu při letu č. 2 11.12.

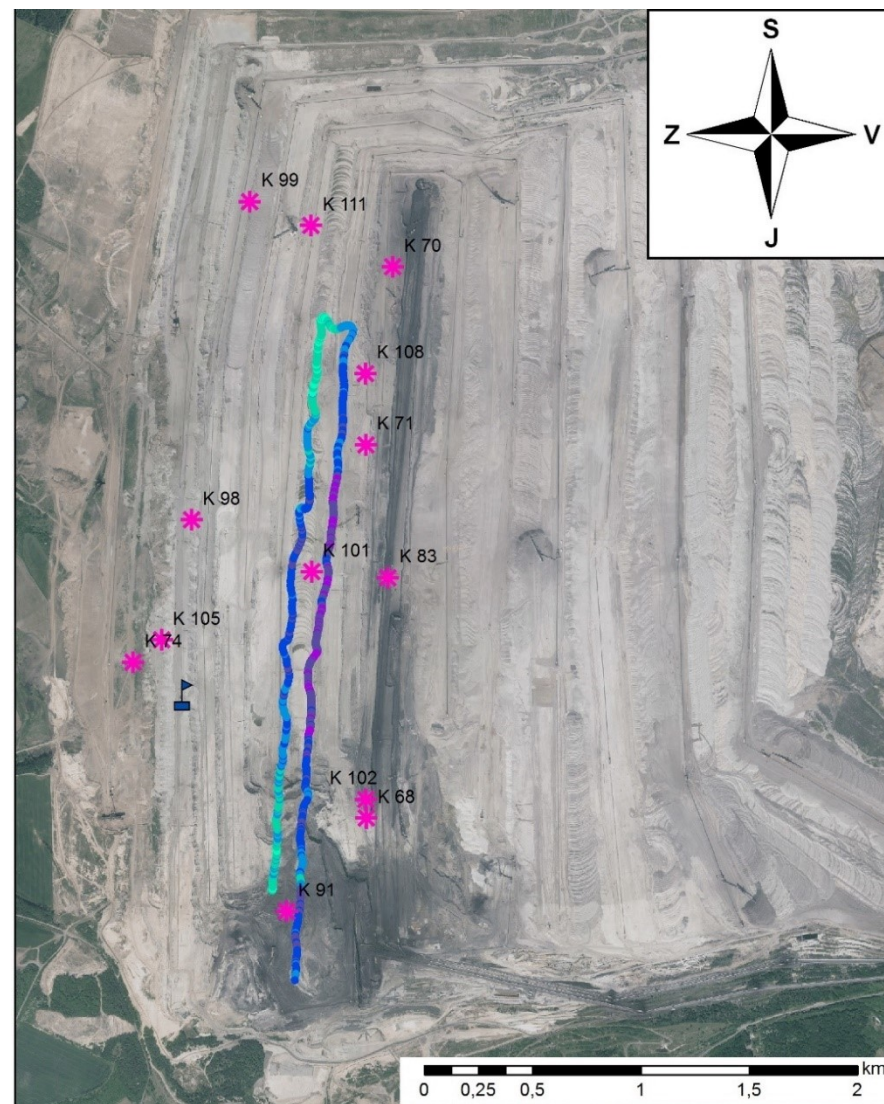


Obr. 56 Velikostní distribuce hmotnosti aerosolu při letu č. 2 11.12., část nad 300 m



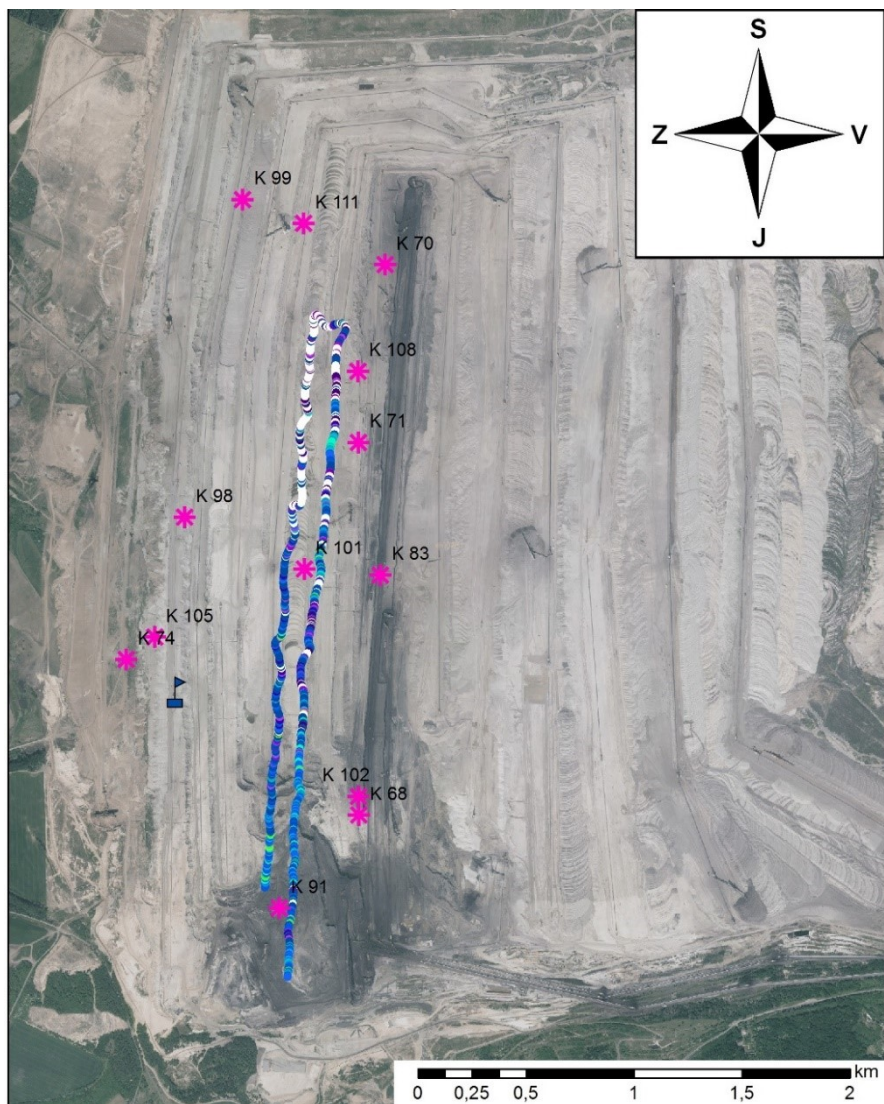


Obr. 57 Hmotnostní koncentrace PM10 v letu č. 3 11.12.2017

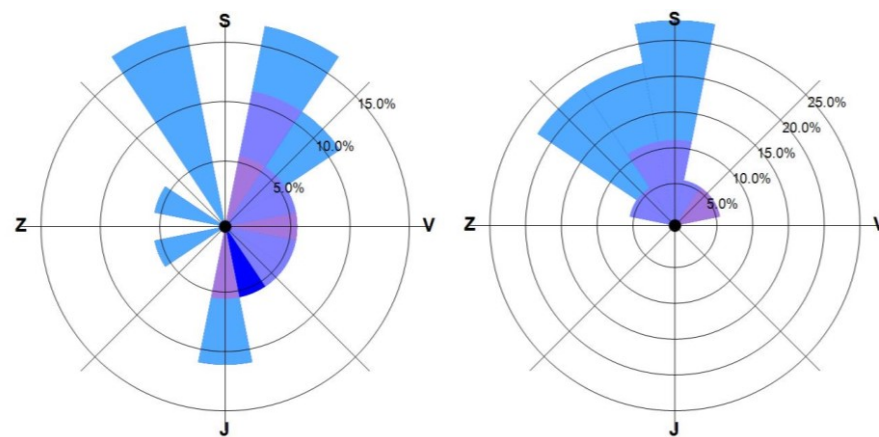


Obr. 58 Hmotnostní koncentrace PM1 v letu č. 3 11.12.2017

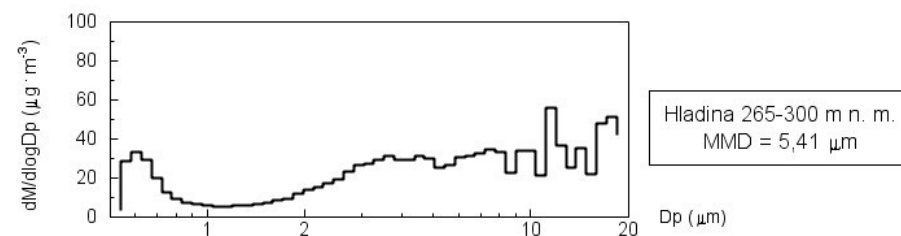




Obr. 59 Hmotnostní koncentrace Coarse v letu č. 3 11.12.2017



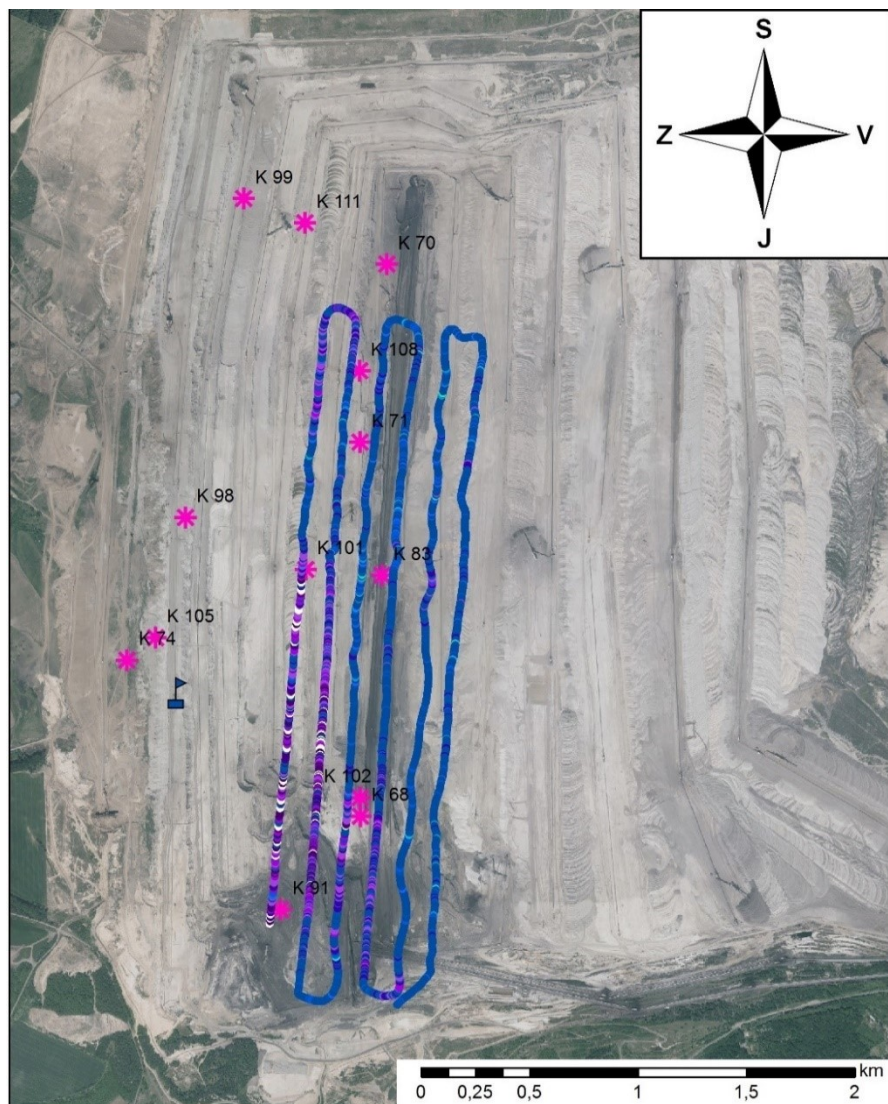
Obr. 60 Větrné růžice k letu č. 3 11.12. 2017



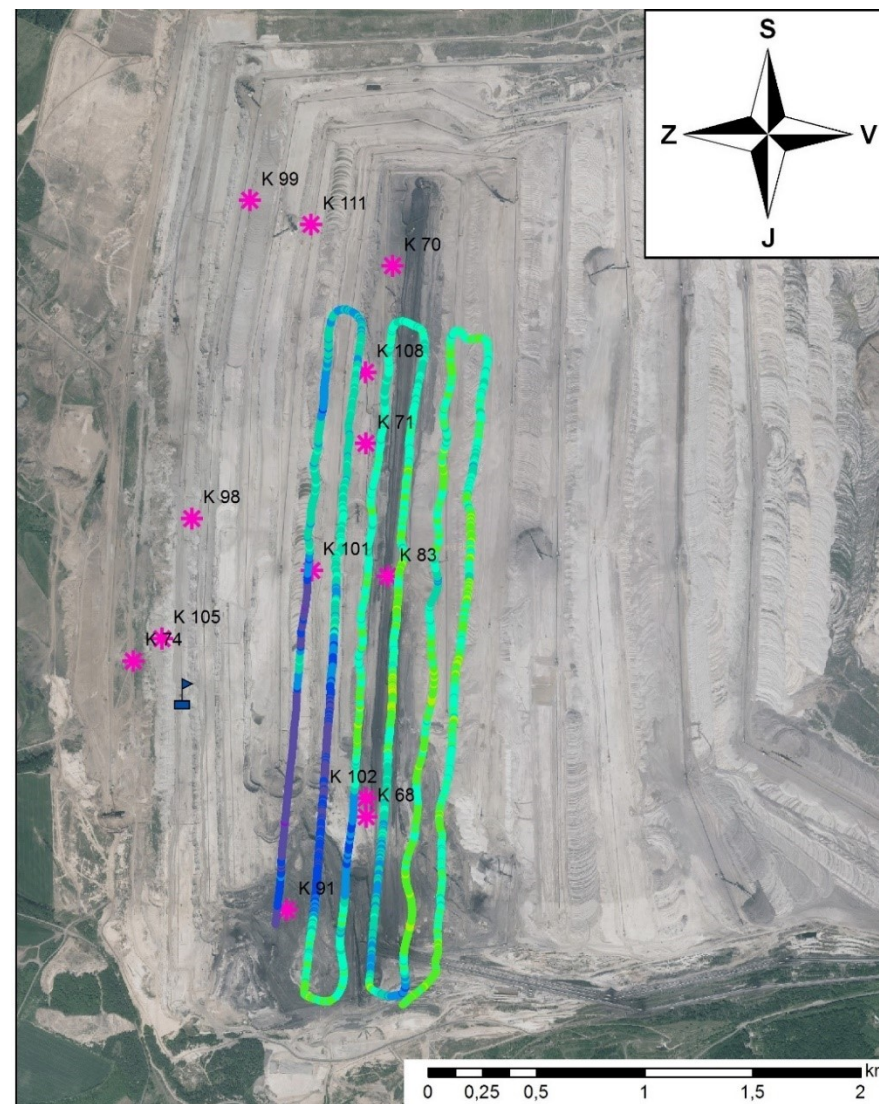
Obr. 61 Velikostní distribuce hmotnosti aerosolu při letu č. 3 11.12.

Let č. 3 je takto krátký z důvodu ztráty dat ze zbytku dne (více v kapitole). Vzhledem k délce trvání letu jsou růžice vytvořeny pouze přibližně z 15 hodnot.



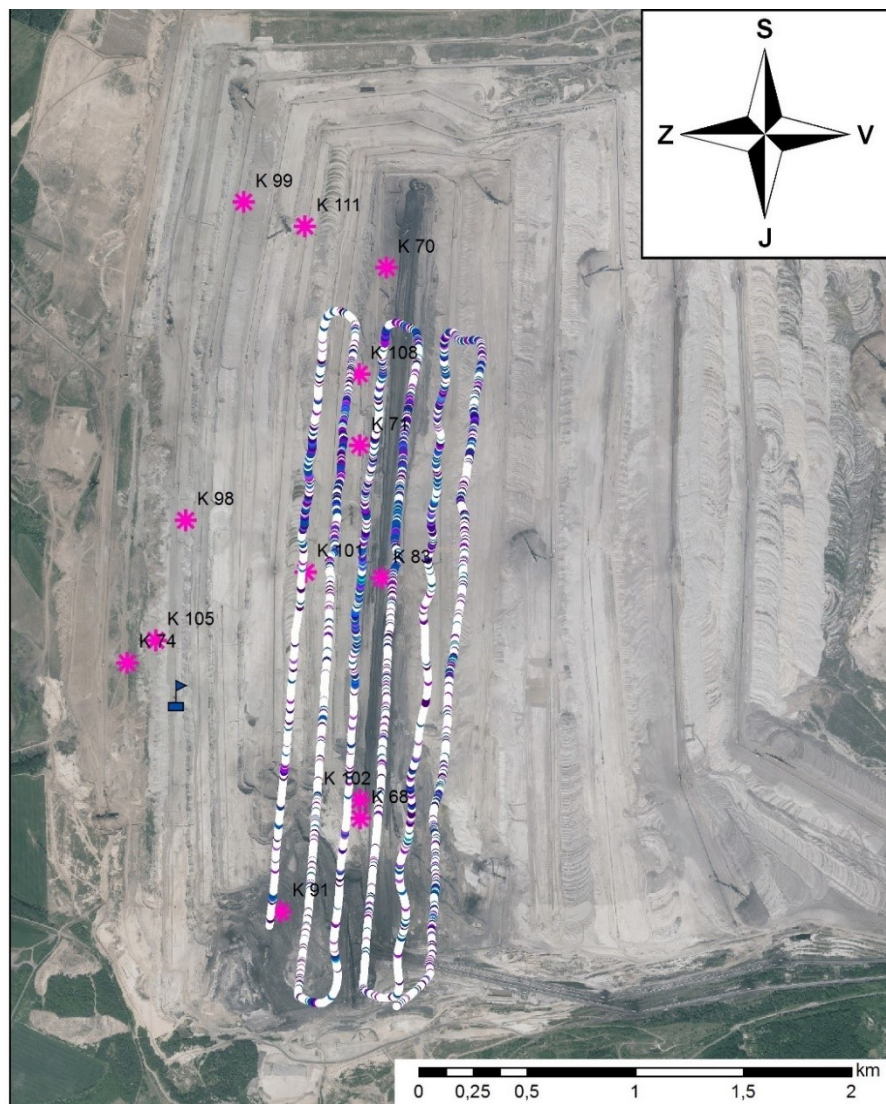


Obr. 62 Hmotnostní koncentrace PM10 v letu č. 1 18.12.2017  
(část A: 15:58-16:51)

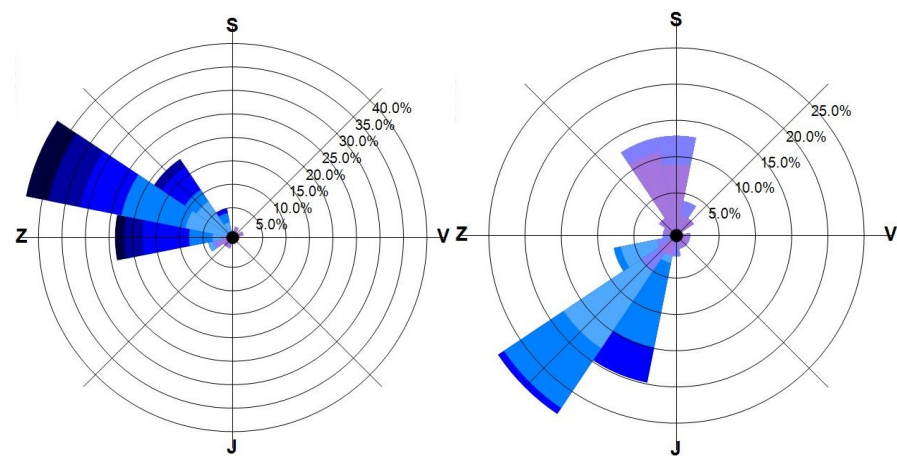


Obr. 63 Hmotnostní koncentrace PM1 v letu č. 1 18.12.2017  
(část A: 15:58-16:51)

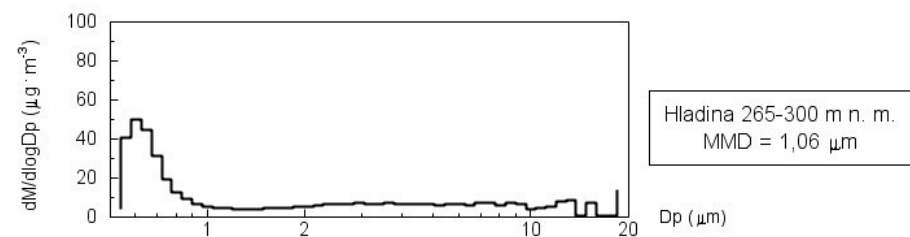




Obr. 64 Hmotnostní koncentrace Coarse v letu č. 1 18.12.2017  
(část A: 15:58-16:51)

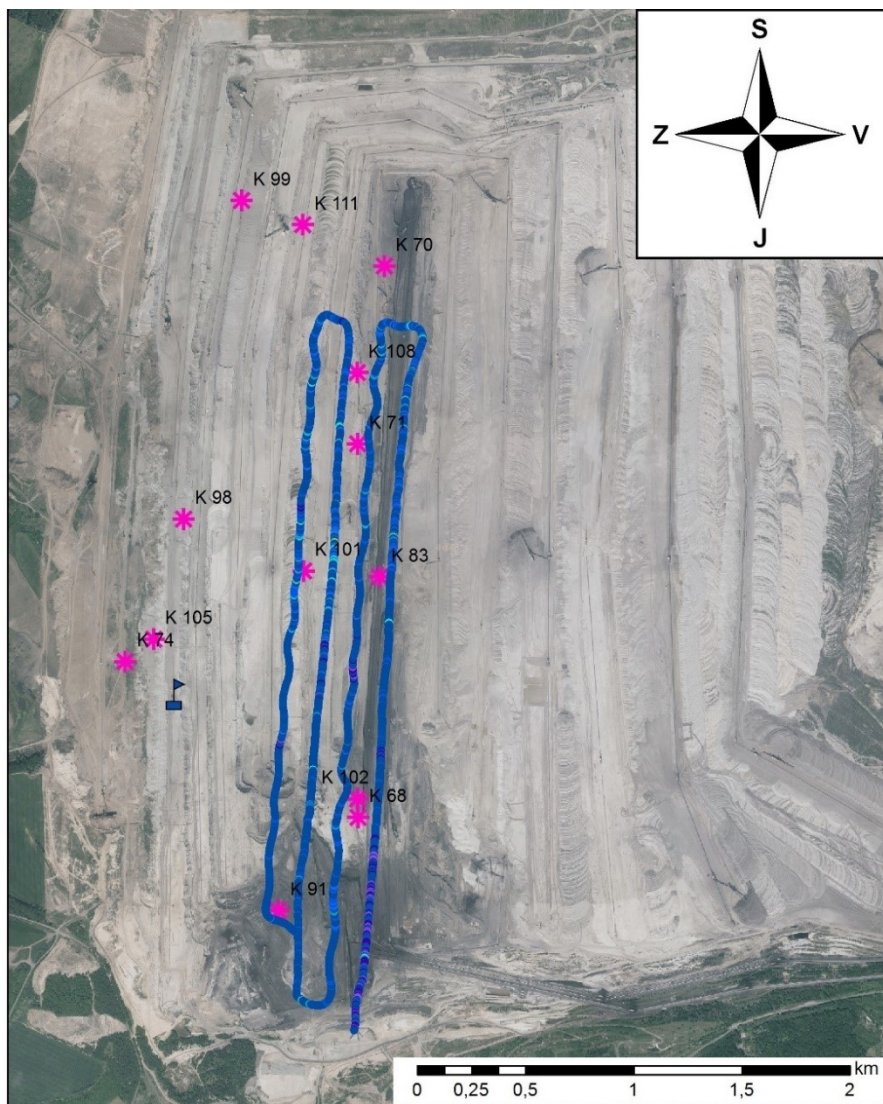


Obr. 65 Větrné růžice k letu č. 1 18.12. 2017

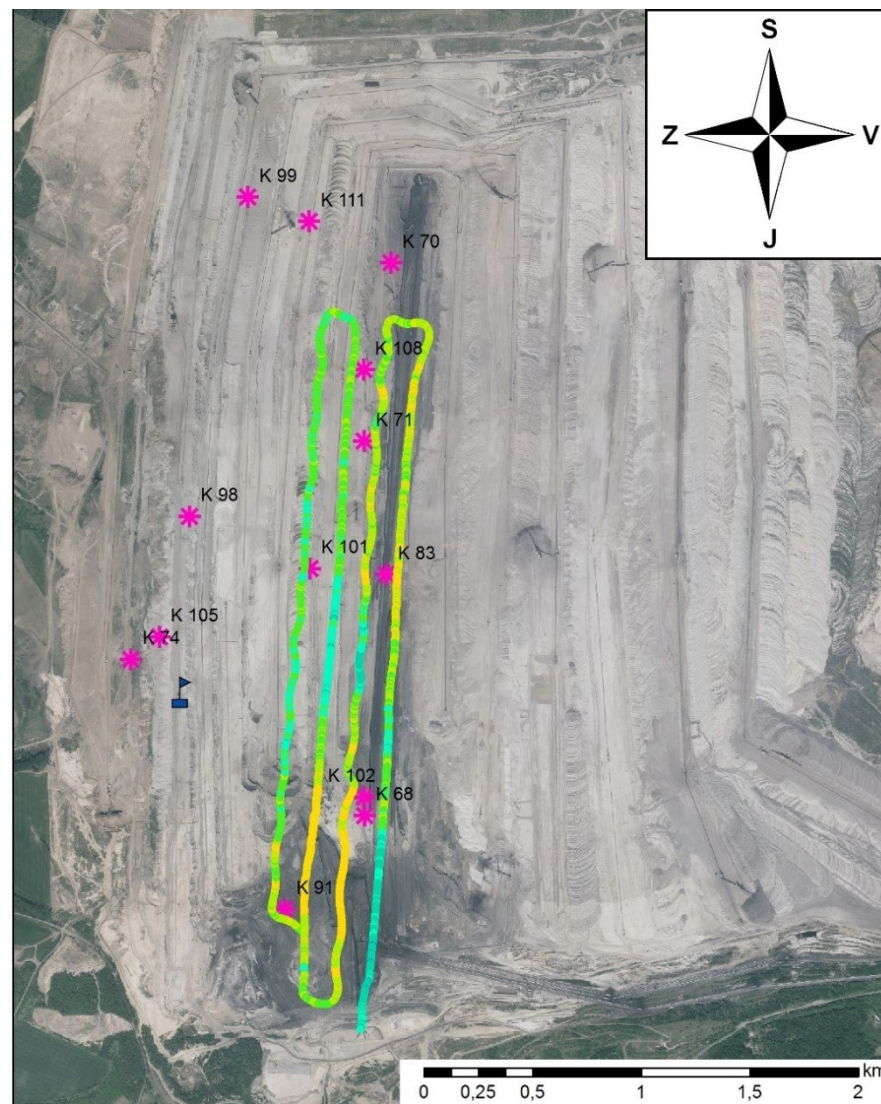


Obr. 66 Velikostní distribuce hmotnosti aerosolu při letu č. 1 18.12.,  
část A



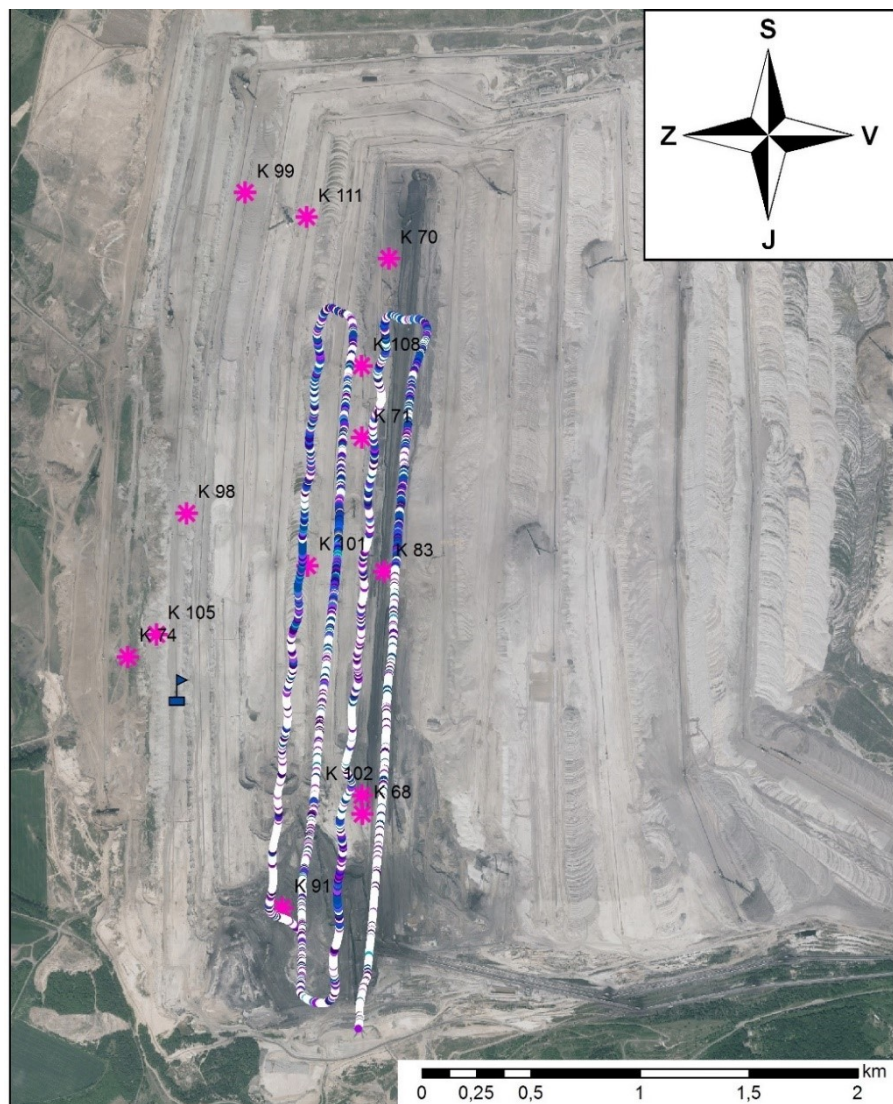


Obr. 67 Hmotnostní koncentrace PM10 v letu č. 1 18.12.2017  
(část B: 16:51-17:37)

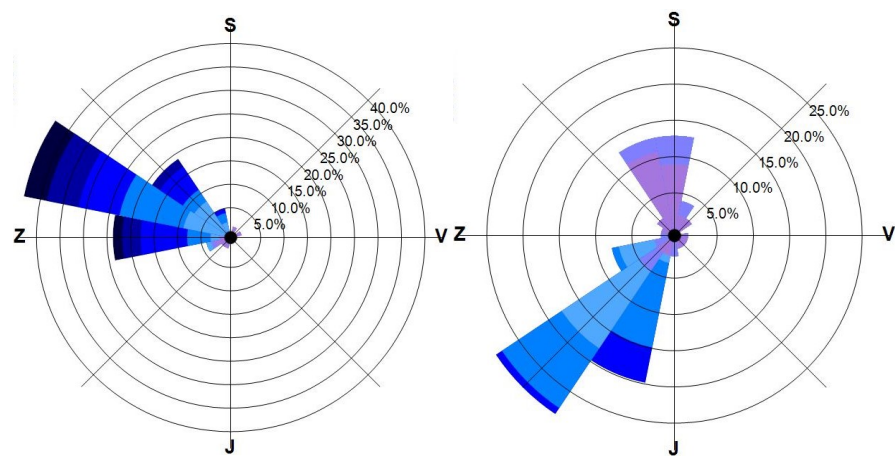


Obr. 68 Hmotnostní koncentrace PM1 v letu č. 1 18.12.2017  
(část B: 16:51-17:37)

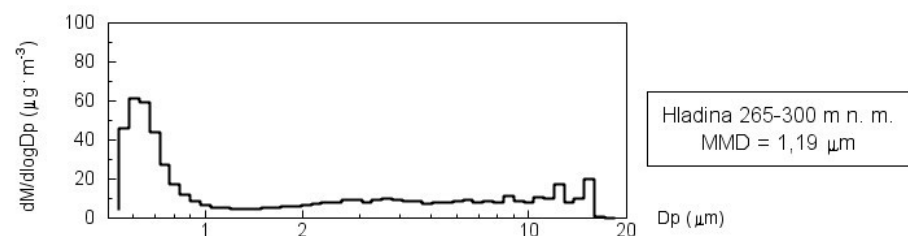




Obr. 69 Hmotnostní koncentrace Coarse v letu č. 1 18.12.2017  
(část B: 16:51-17:37)

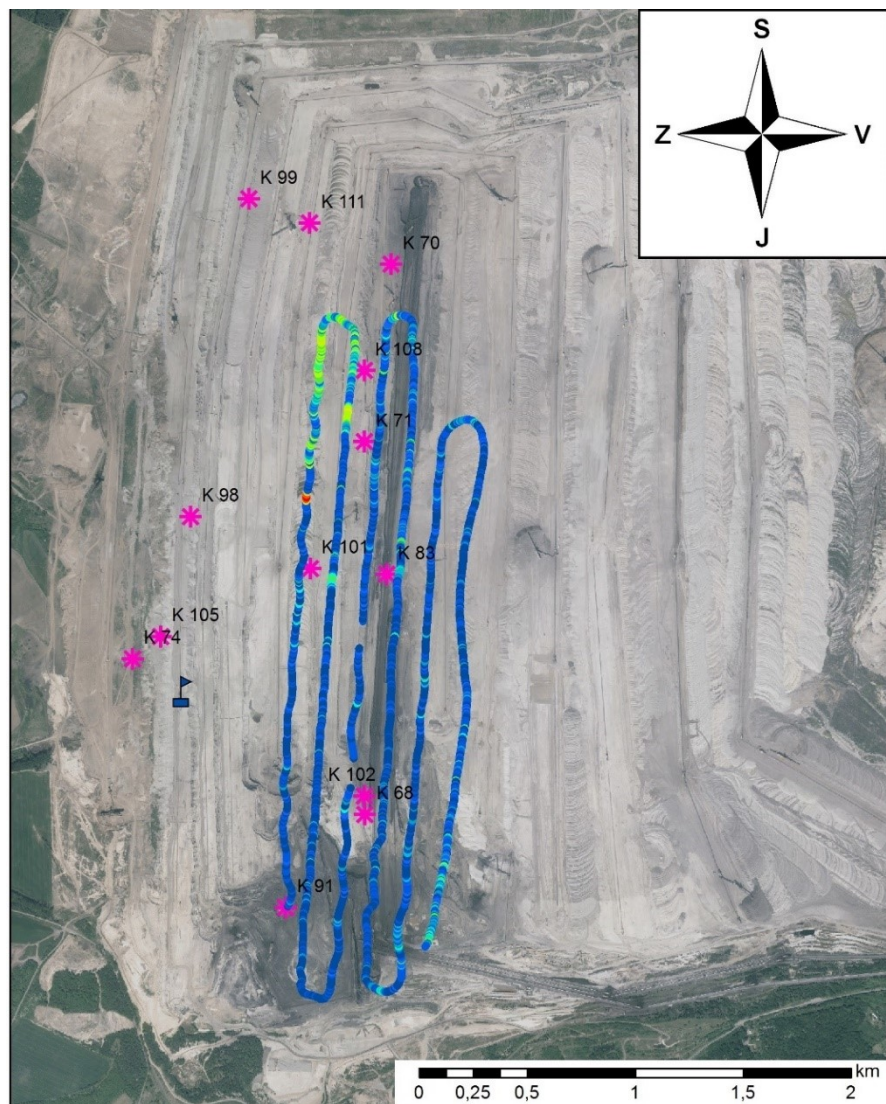


Obr. 70 Větrné růžice k letu č. 1 18.12. 2017 (stejně jako v části A)

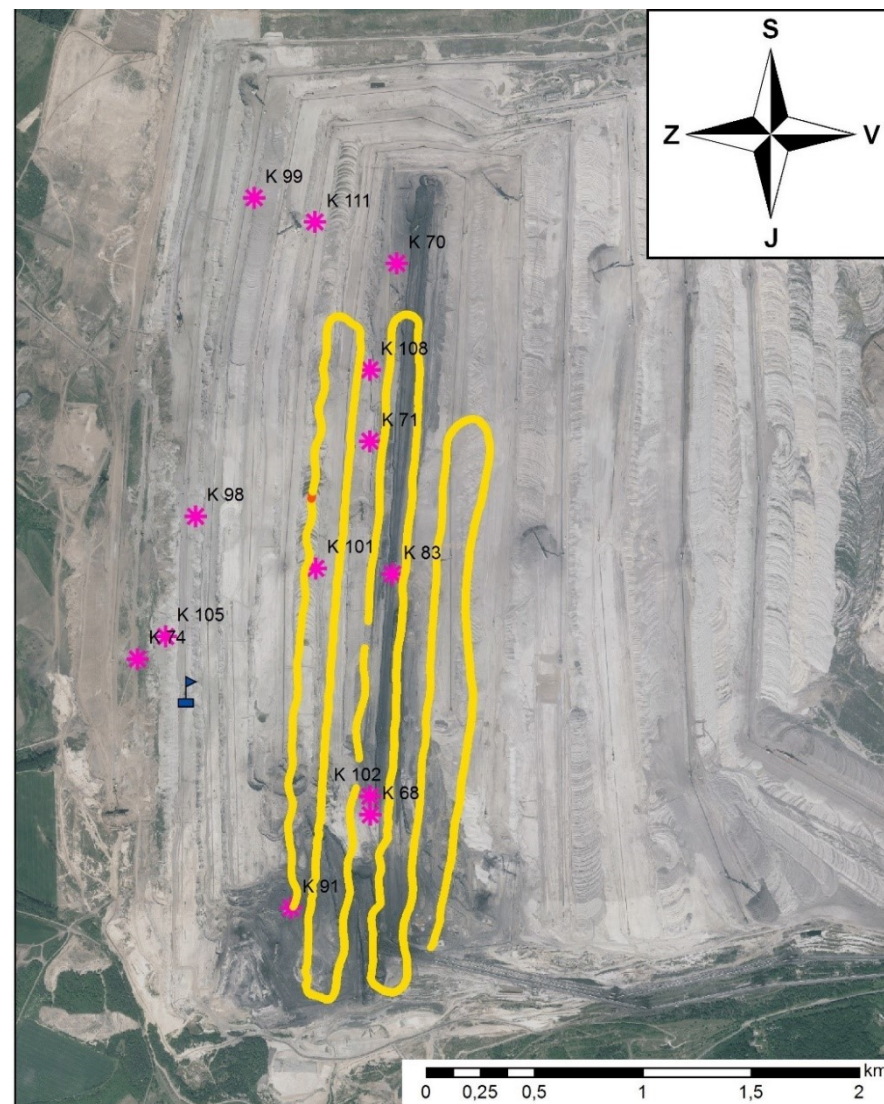


Obr. 71 Velikostní distribuce hmotnosti aerosolu při letu č. 1 18.12.,  
část B



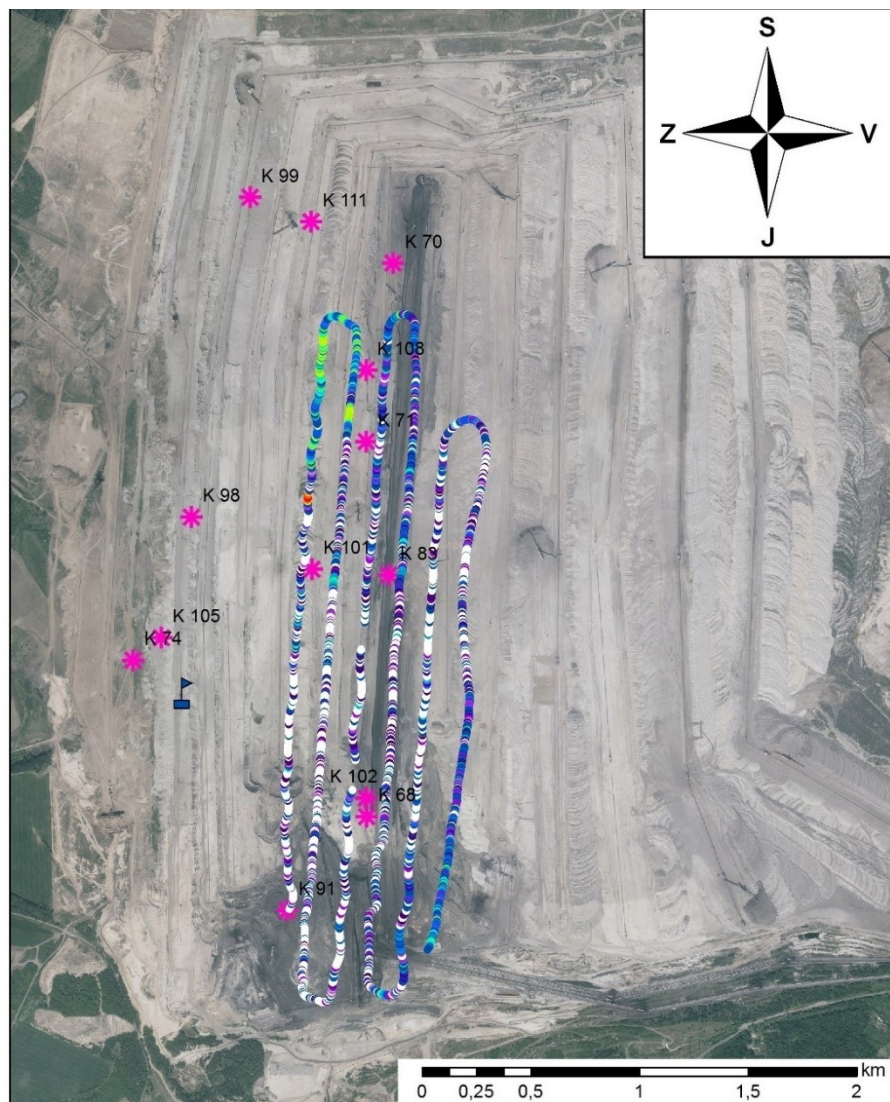


Obr. 72 Hmotnostní koncentrace PM10 v letu č. 4 19.12.2017

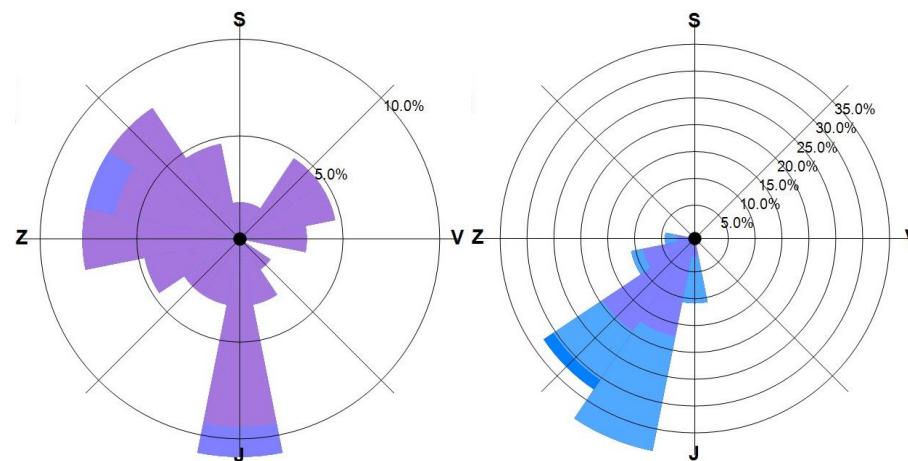


Obr. 73 Hmotnostní koncentrace PM1 v letu č. 4 19.12.2017

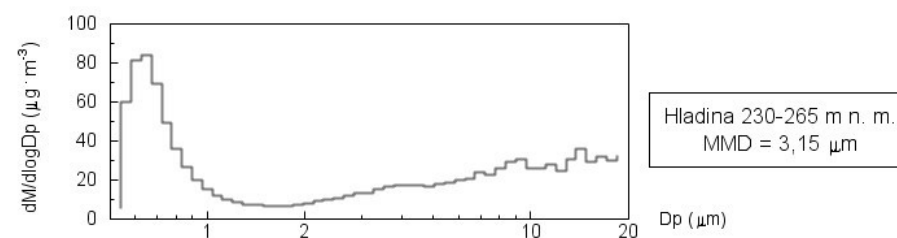




Obr. 74 Hmotnostní koncentrace Coarse v letu č. 4 19.12.2017

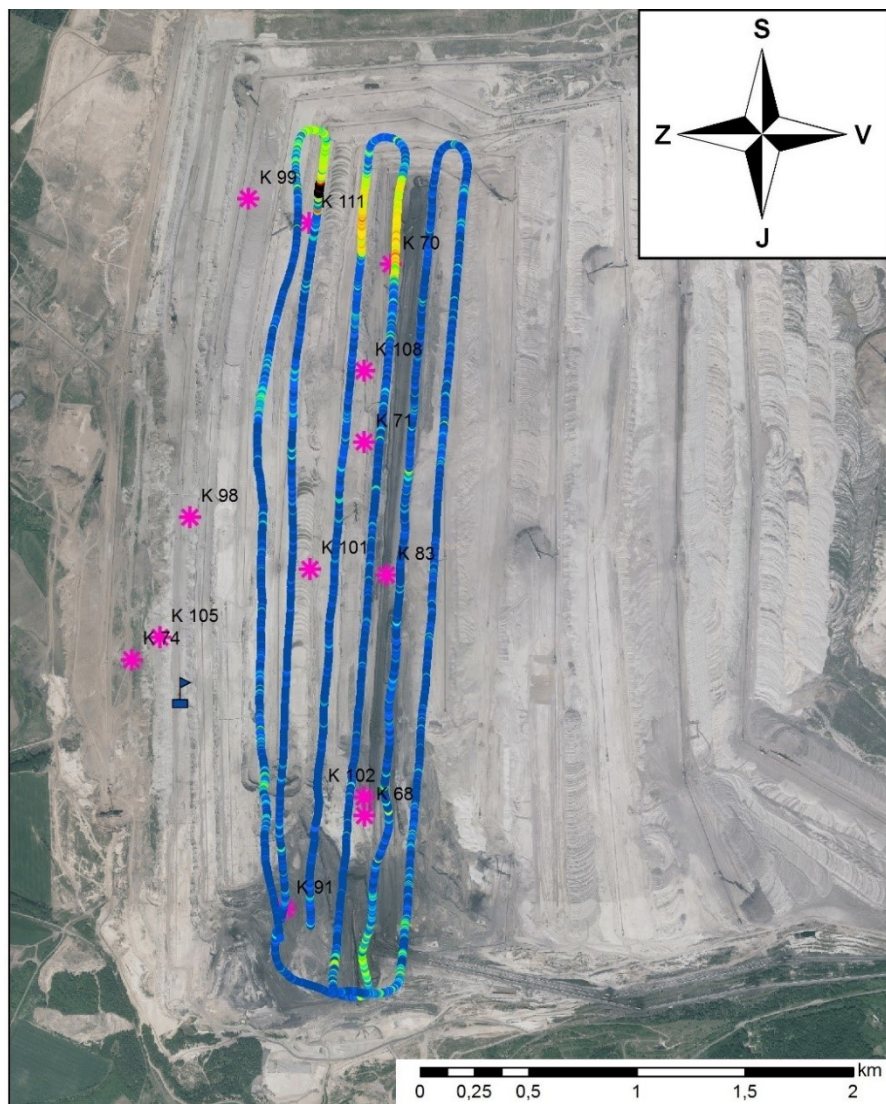


Obr. 75 Větrné růžice k letu č. 4 19.12. 2017

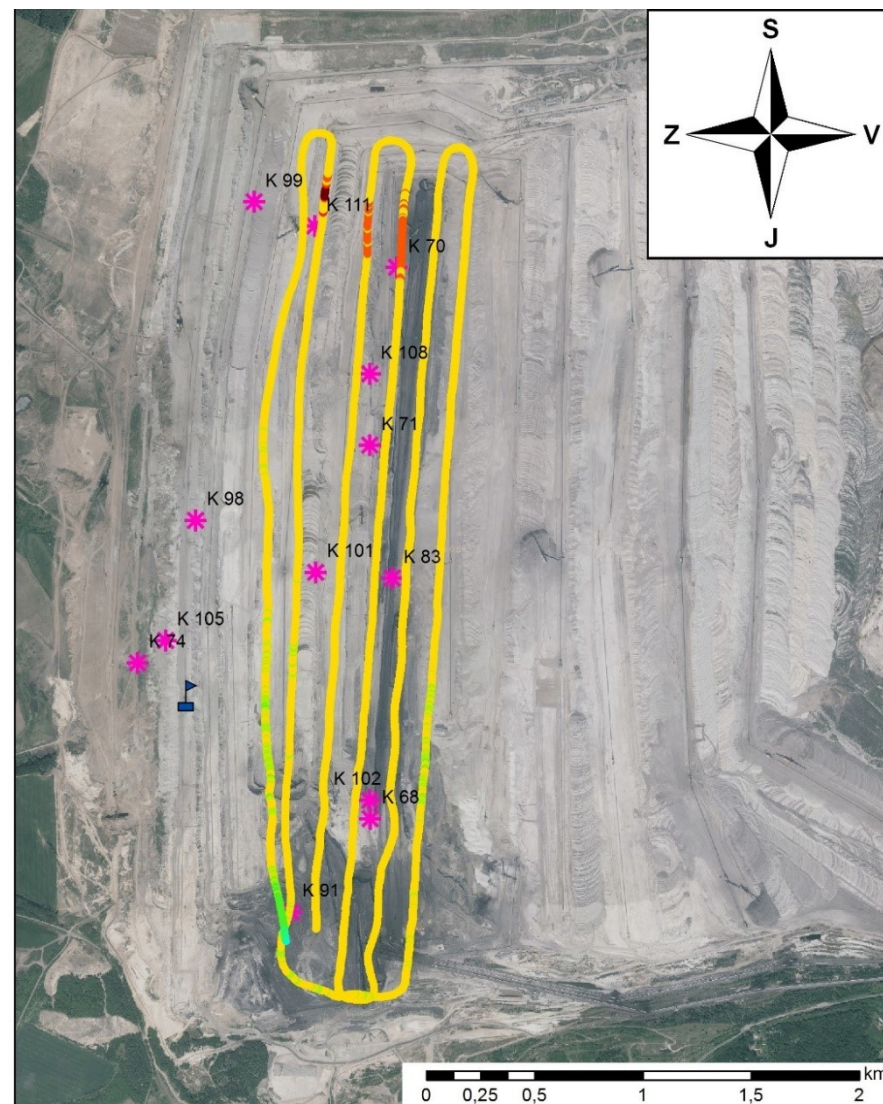


Obr. 76 Velikostní distribuce hmotnosti aerosolu při letu č. 4 19.12.



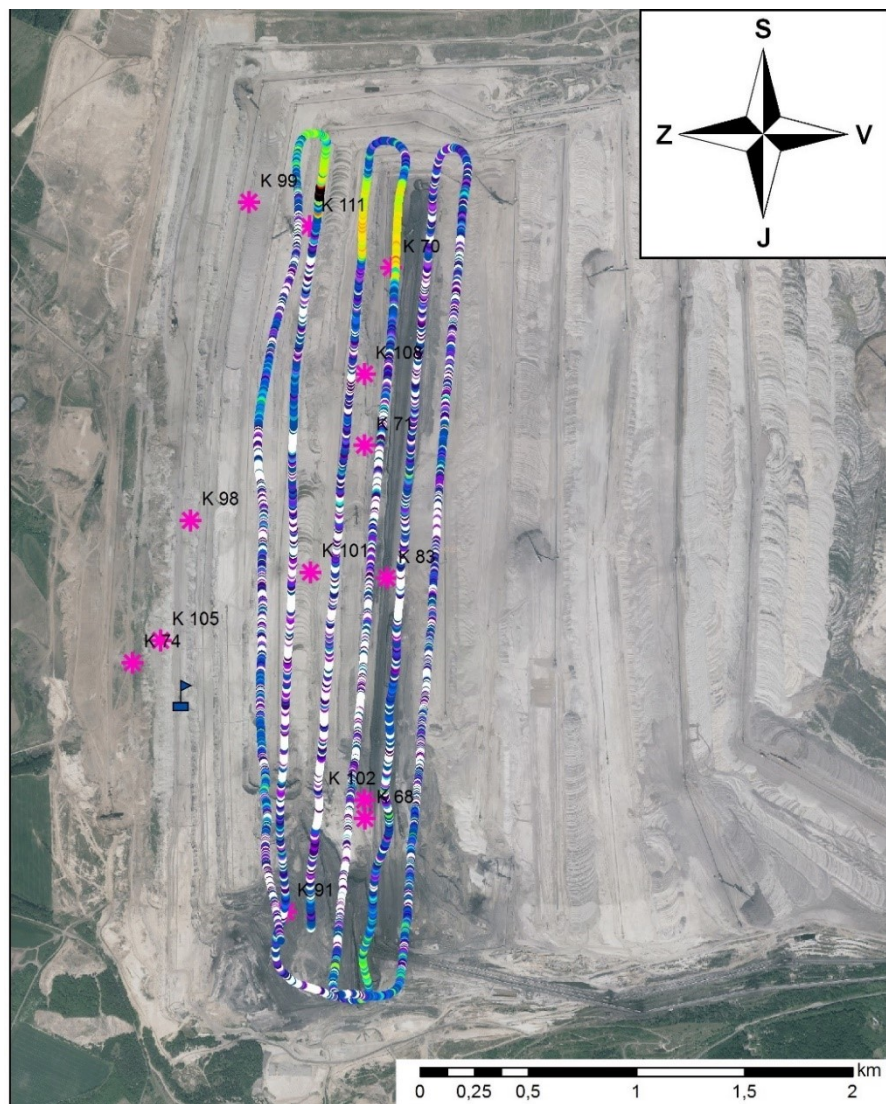


Obr. 77 Hmotnostní koncentrace PM10 v letu č. 5 19.12.2017

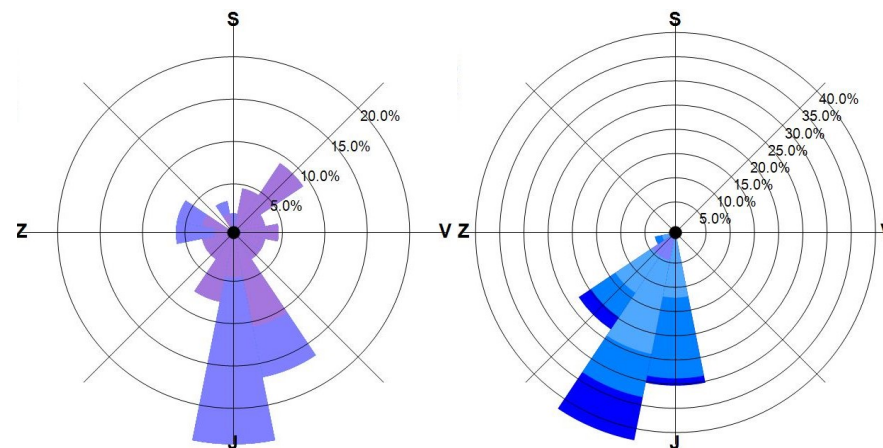


Obr. 78 Hmotnostní koncentrace PM1 v letu č. 5 19.12.2017

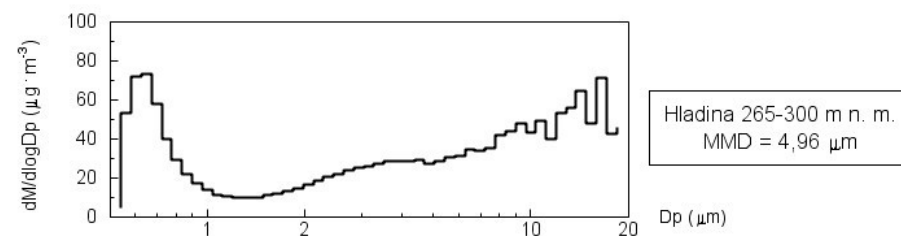




Obr. 79 Hmotnostní koncentrace Coarse v letu č. 5 19.12.2017



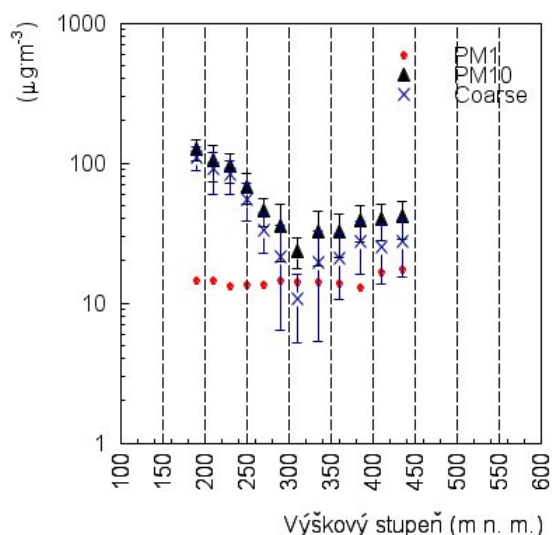
Obr. 80 Větrné růžice k letu č. 4 19.12. 2017



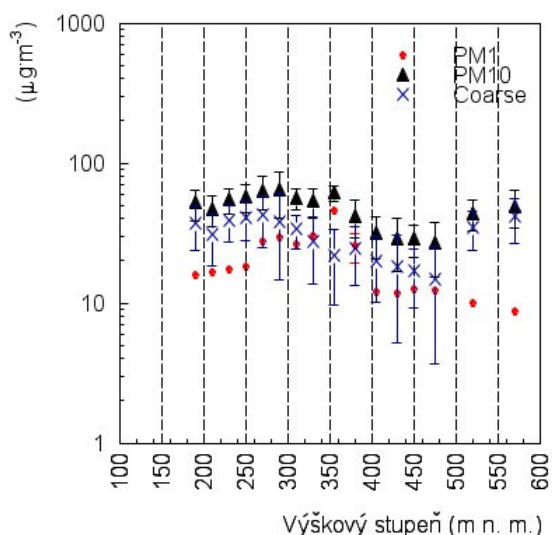
Obr. 81 Velikostní distribuce hmotnosti aerosolu při letu č. 5 91.12.

## 6.6 Vertikální profil horního decilu hodnot

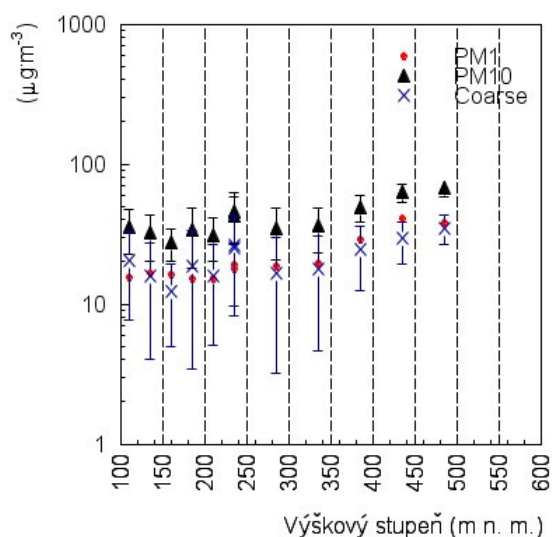
K lepšímu určení vertikálních trendů poklesu hmotnostních koncentrací byly vytvořeny z každé hladiny geometrické průměry 10% nejvyšších hodnot. Toto zpracování bylo vytvořeno pro všechny vertikální lety kromě letu č. 9 ze dne 19.12., v němž byly kvůli silnému větru velké rozdíly mezi počtem vzorků nasbíraných po cestě na sever a po cestě na jih. V kratším souboru tvořily 10% nejvyšších hodnot např. jen 2 hodnoty, které mi nepřipadalo vhodné průměrovat.



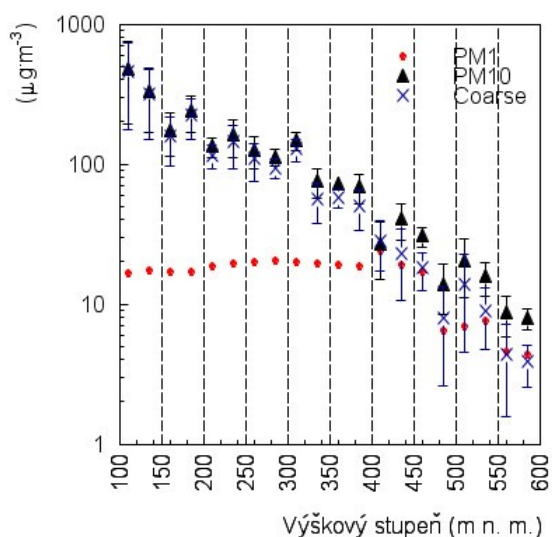
Obr. 82 Geom. průměry 10% nejvyšších hodnot v různých výškových hladinách 18.12. č. 2



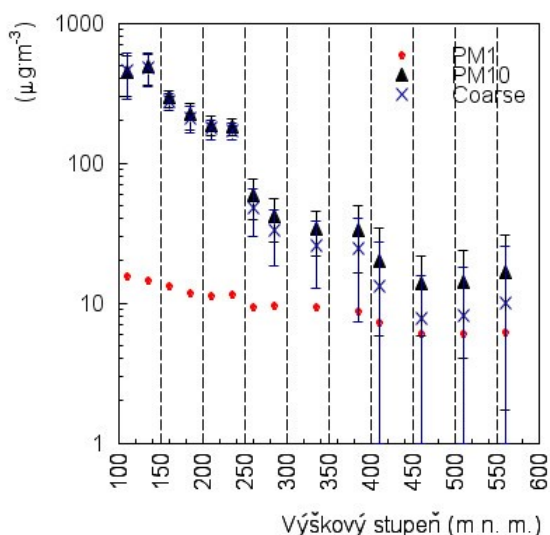
Obr. 83 Geom. průměry 10% nejvyšších hodnot v různých výškových hladinách 18.12. č. 3



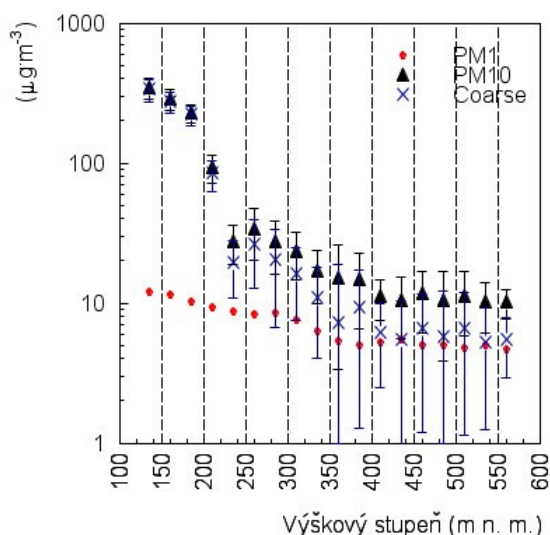
Obr. 84 Geom. průměry 10% nejvyšších hodnot v různých výškových hladinách 19.12. č. 1



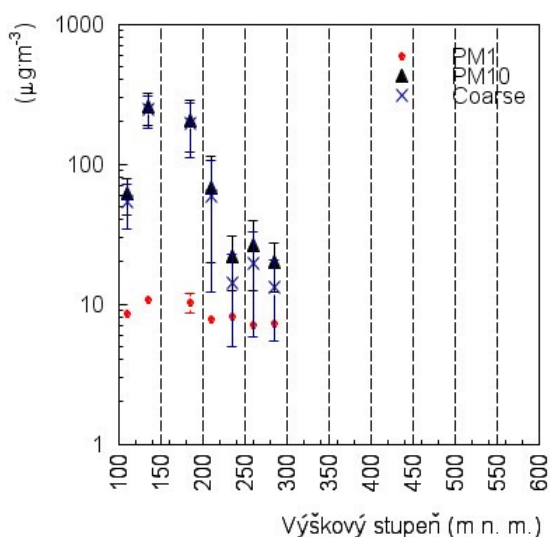
Obr. 85 Geom. průměry 10% nejvyšších hodnot v různých výškových hladinách 19.12. č. 2



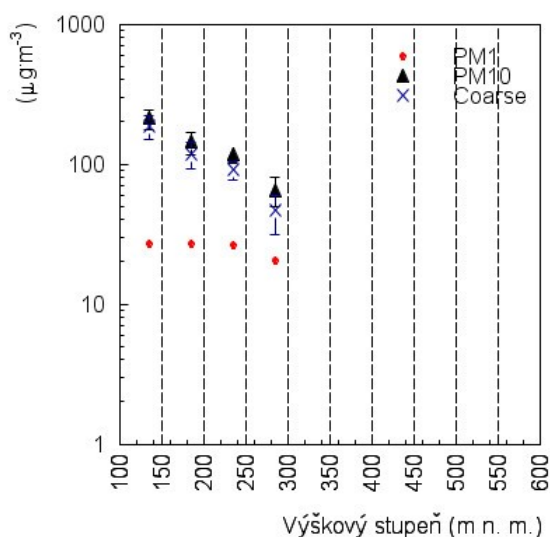
Obr. 86 Geom. průměry 10% nejvyšších hodnot v různých výškových hladinách 19.12. č. 6



Obr. 87 Geom. průměry 10% nejvyšších hodnot v různých výškových hladinách 19.12. č. 7

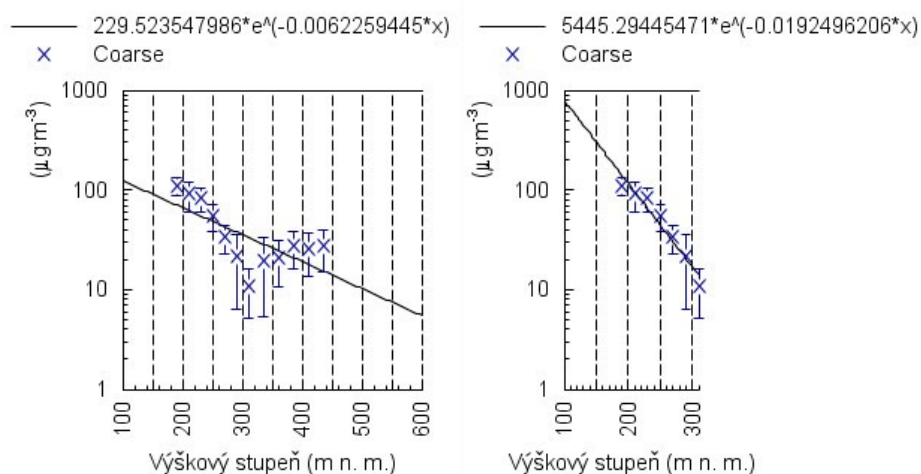


Obr. 88 Geom. průměry 10% nejvyšších hodnot v různých výškových hladinách 19.12. č. 8

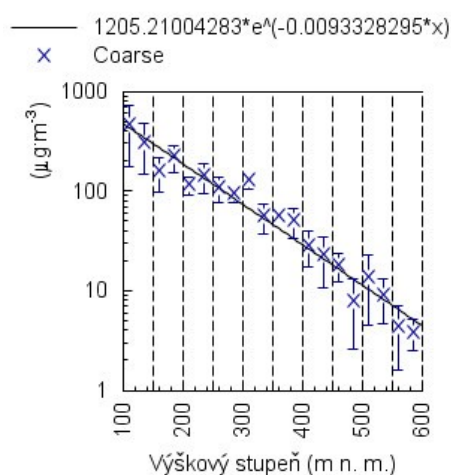


Obr. 89 Geom. průměry 10% nejvyšších hodnot v různých výškových hladinách 20.12. č. 1

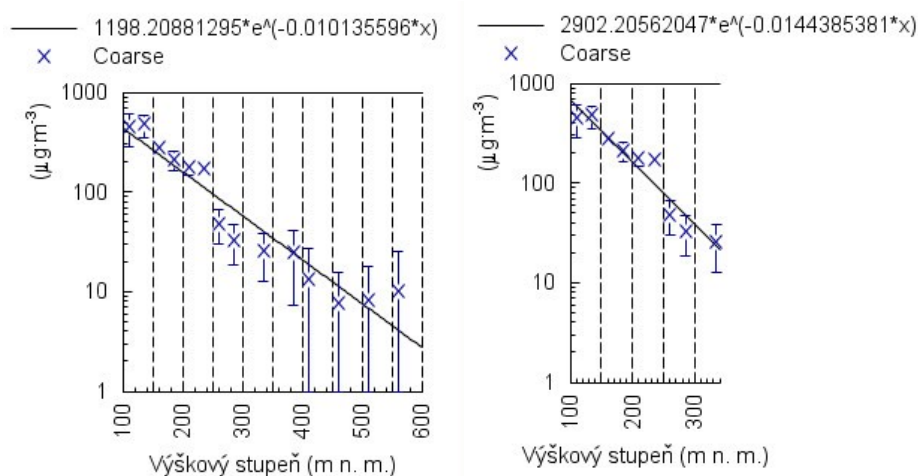
Z grafů je vidět, že průběh křivek PM10 a Coarse je obdobný, oproti průběhu koncentrace PM1 (s výjimkou letu č. 1 19.12.). Křivka Coarse se ve vyšších vrstvách od křivky PM10 odděluje a pokračuje strměji dolů, což svědčí o rychlejším poklesu hrubých částic, který byl předpokládán. Pokles se zvyšující se výškou však nenastává po celou dobu výškového stoupání ve všech zobrazených datech. Následující obrázky proto zobrazují pouze křivku Coarse proloženou exponenciálním trendem, pokud byl nějaký pokles z předešlých grafů patrný. Exponenciální pokles hmotnostní koncentrace Coarse s výškou se většinou u hmotnostní koncentrace vyskytuje (Hovorka in Braniš et al., 2011). Byl-li alespoň na začátku patrný pokles, který se později výrazně zmínil nebo nabral dokonce opačný směr, byl graf zkrácen a určena exponenciální závislost u této části letu.



Obr. 90 a 91 Geom. průměry 10% nejvyšších hodnot hmotnostní koncentrace Coarse proložené exponenciální závislostí 18.12.2017 č. 2 (u obr. 91 zkráceno)

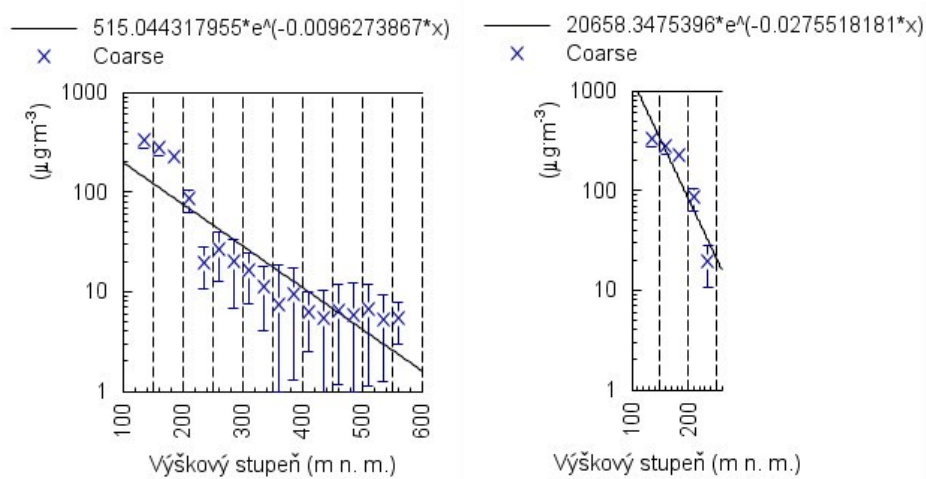


Obr. 92 Geom. průměry 10% nejvyšších hodnot hmotnostní koncentrace Coarse proložené exponenciální závislostí 19.12.2017 č. 2

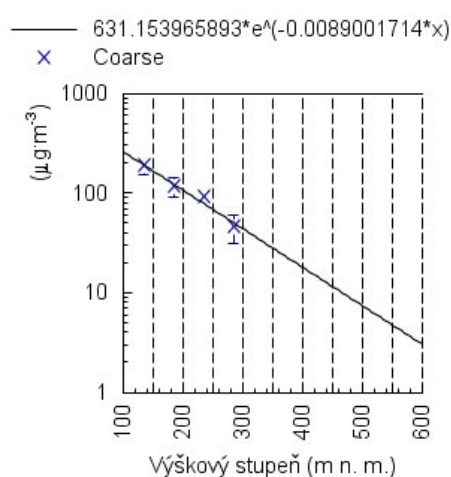


Obr. 93 a 94 Geom. průměry 10% nejvyšších hodnot hmotnostní koncentrace Coarse proložené exponenciální závislostí 19.12.2017 č. 6 (u obr. 94 zkráceno)





Obr. 95 a 96 Geom. průměry 10% nejvyšších hodnot hmotnostní koncentrace Coarse proložené exponenciální závislostí 19.12.2017 č. 6 (u obr. 96 zkráceno)



Obr. 97 Geom. průměry 10% nejvyšších hodnot hmotnostní koncentrace Coarse proložené exponenciální závislostí 20.12.2017 č. 1

U koncentrace letu č. 2 z 18.12. vyšla regrese exponenciální signifikantně, i když je pokles znatelný jen do výškové hladiny 310 m a následně stoupá (nejspíše v důsledku teplotní inverze).

Parametry exponenciální regrese celého letu jsou:

$$y = 229,523547986 * e^{(-0,0062259445 * x)}$$

$$R^2 = 0,4850$$

$$p = 0,0119$$

Parametry exponenciální regrese do 310 m n. m. jsou:

$$y = 5445.29445471 * e^{(-0.0192496206 * x)}$$

$$R^2 = 0.9442$$

$$p = 0,003$$

Koncentrace Coarse u letu č. 3 z 18.12. v nejnižších hladinách neklesá, mírný pokles je znatelný až 350 m n. m., později ale opět dochází ke zvýšení. Let č. 1 z 19.12. nevykazuje žádný pokles a

naopak dochází po celou dobu k mírnému nárůstu. Tyto lety tedy předpoklad exponenciálního poklesu nesplňují.

U letu č. 2 z 19.12. je patrný exponenciální pokles ve všech výškových hladinách:

$$y = 1205,21004283 * e^{(-0,0093328295 * x)}$$

$$R^2 = 0,9538$$

$$p = 0,000$$

Koncentrace letu č. 6 z 19.12. klesá taktéž exponenciálně.

$$y = 1198,20881295 * e^{(-0,010135596 * x)}$$

$$R^2 = 0,9120$$

$$p = 0,000$$

Výraznější pokles je však patrný v části do 335 m n. m., km exponenciální pokles pasuje ještě lépe:

$$y = 2902,20562047 * e^{(-0,0144385381 * x)}$$

$$R^2 = 0,9245$$

$$p = 0,000$$

V letu č. 7 z 19.12. je taktéž patrný exponenciální pokles:

$$y = 515,044317955 * e^{(-0,0096273867 * x)}$$

$$R^2 = 0,7983$$

$$p = 0,000$$

Výraznější pokles zde nastává do výšky 260 m n. m. Parametry exponenciální regrese jsou:

$$y = 20658,3475396 * e^{(-0,0275518181 * x)}$$

$$R^2 = 0,8532$$

$$p = 0,250$$

Let č. 8 19.12. má netypický průběh oproti ostatním grafům, jelikož z nejnižší hladiny do hladiny o jednu vyšší následuje výrazné zvýšení koncentrace a následně pokles. Tento výrazný skok mohl dle mého názoru vzniknout v důsledku průletu jen části trasy nejnižší vrstvy a mohl tedy minout nejvýznamnější zdroje znečištění. Celý let už ale byl ovlivněn silnějšími povětrnostními podmínkami, kvůli kterým nebyl tímto způsobem zpracován let č. 9. Další možností je ukončení těžebních prací v době před započítáním tohoto letu, chyběl by tedy zdroj částic. Tato zvláštní situace bude dále diskutována v souvislosti s ostatními výsledky z tohoto letu a z letů předcházejících a následujících.

Let ze 20.12. se skládá pouze ze čtyř nadmořských výšek, proložení trendem tedy není tak spolehlivé, ale i tak vychází exponenciální pokles signifikantně:

$$y = 631,153965893 * e^{(-0,0089001714 * x)}$$

$$R^2 = 0,9691$$

$$p = 0,0156$$



## 7 Diskuze

Hinds (1999) uvádí pro uhlé částice rozmezí velikostí 1-100  $\mu\text{m}$  (obr. xy), což je poměrně široké rozpětí. Civiš et al. (2011) experimentálně stanovili maximum v distribuci hmotnosti uhlých částic na velikost přibližně mezi 7 – 12  $\mu\text{m}$  a Grégr et al. (2011) pak na 8 – 10  $\mu\text{m}$  (rozmezí stanovovaných velikostí bylo stejné jako v mých distribučních grafech), Huertas et al. (2012b) pak o něco menší. Hrubé částice, ať už samostatně nebo ve frakci PM10 jsou pak v souvislosti s povrchovou těžbou stanovovány v mnoha pracích – např. Huertas et al. (2012a,b), Chaulya (2004), Pokorná et al. (2016), Tatrakovsky et al. (2016) atd. Zvýšené množství hrubých částic v prostoru hnědouhelného dolu bylo zjištěno i v této práci.

Šroubovicový let mezi rypadly jasně ukazuje vyšší hmotnostní koncentraci oproti šroubovici bez rypadel. Vyšší koncentrace PM10 a Coarse jsou také patrné v nižších výškových hladinách grafů vertikálních letů z Přílohy č. 3. Uvedené MMD v grafech v Příloze č. 2 pak tyto hodnoty kvantifikují. Ve spodních patrech dolu je při některých letech hodnota MMD v hladině 110 nebo 135 m skutečně okolo 8  $\mu\text{m}$ . Toto ale není patrné u všech letů. Např. let 19.12. č. 1 má v nejnižší hladině MMD v oblasti jemných částic pod 1  $\mu\text{m}$ , let č. 9 z 19.12. pak 1,48  $\mu\text{m}$ . To by znamenalo, že buď hrubé částice nebyly generované nebo byly odstraněny rychleji, než stačily vystoupat do hladiny letu vzducholodi. Z vlastních záznamů o počasí není patrný důvod pro nižší koncentrace v letu č. 1 19.12. Z videa pořízeného při tomto letu je však patrné, že velkostroje nepracují. Ve videu pořízeném z letu č. 1 11.12. je patrná větší těžební aktivita. Absenci hrubých částic v letu č. 1 19.12. bych tedy přisoudila nižší těžební aktivitě, jelikož v severočeském hnědouhelném dole Vršany byla zjištěna nejvyšší koncentrace hrubých částic právě v místě, kde docházelo k těžbě skryvky a uhlí (Dočekalová, 2015). Na rozdíl od letu č. 9, před kterým proběhla krátká epizoda deště se sněhem, která mohla vzduch nejen vyčistit, jelikož vymývání částic srážkami je hlavním způsobem odstranění hrubých částic z ovzduší (Hovorka in Braniš et al., 2011), ale mohla způsobit i snížení prašnosti z mokrého povrchu, jelikož v suchých podmínkách dochází k vyššímu rozptylu částic (Jones et al., 2002; Severočeské doly a.s., 2018d). Déšť a vlhkost vzduchu jsou jedněmi z nejdůležitějších faktorů ovlivňujících disperzi PM (Pandey et al., 2014). Není ale známo, jak dlouho přístroje pracovaly, jestli je možné, že ve stabilních podmínkách setrvaly částice ve vyšší vrstvě nebo došlo ke koagulaci částic menších, které pak navýšily koncentraci hrubých částic (Baron & Willeke, 2005), které by mohly naopak pocházet i z okolí.

Těžební aktivita a počasí (roční doba) měly vliv i na šíření částic ve vertikále. Z většiny grafů v Příloze č. 2 i 3 je patrný pokles hrubých částic s výškou. Ze zpracování horních 10% nejvyšších hodnot v každém patře v kapitole není vždy patrný exponenciální pokles s výškou, jak platí pro delší časový horizont (Hovorka in Braniš et al., 2011). O pokles frakce Coarse se ale dle grafů v Příloze č. 3 jedná ve všech případech kromě letů 18.12. č. 2 a 19.12. č. 1. U částic PM<sub>1</sub> je chod s výškou různý. Se stoupající výškou tedy klesá vliv hrubých částic na koncentraci PM<sub>10</sub> a odráží se v ní spíše zastoupení frakce jemné. Pokles Coarse je patrný jak v hmotnostní, tak v početní koncentraci. Podobné vztahy mezi výškou a koncentrací hrubých i jemných částic potvrzují i Patra et al. (2015). Významnější pokles je např. patrný v letech 6 a 7 z 19.12. V letu č. 9 sice tak patrný pokles není, ale všechny koncentrace jsou nižší než v ostatních grafech. Toto je podle mě také způsobeno srážkami, jelikož před letem č. 9 a na jeho konci padala v místě odletu drobná krupička. Je možné, že v prostoru dolu srážky přetrvávaly delší dobu, a proto je prostor od částic vyčištěn. U letu č. 6 by pokles koncentrace Coarse mohl být opět v důsledku srážek deště se sněhem, které byly před tímto letem patrné. Před letem č. 7 už ale žádné další srážky nevypadávaly, proto je rychlejší pokles překvapující.

V tomto případě by pokles mohl být způsoben jednodušším prouděním větru, který částice odvane, jelikož se jedná o absenci zejména hrubých částic, jejichž pohyb v dolu je nejvíce ovlivněn právě větrem (Gautam & Patra, 2015). V zimních měsících ale v mezní vrstvě panují spíše stabilnější podmínky s nižšími rychlostmi větru, které přenos částic horizontálním nepodporují (Reddy & Ruj, 2003). Absence hrubých částic začíná nad výškou 200 m, přičemž hranice dobývacího území je ve výšce od 250 m. Z grafů pro vertikální směr větru je patrné (Příloha č. 1 a Výsledky 6.1), že vítr vane u každého z anemometrů často přesně opačně a zejména 19.12. vane u anemometru A2 (červeně) v západní části lomu mírně dolů a u A1 ve východní části naopak mírně nahoru. Z tohoto a vertikálních grafů bych usuzovala, že okolní vítr vane ve svrchních patrech dolů, ale do nižších již nezasahuje. Snížení ventilace v nižších částech ukazuje model od Chowdhary (1977), který ovšem nepotvrzuje měření Gautam & Patra (2015), kde se nejvyšší rychlost proudění nachází na hraně dobývacího území, postupem do hloubky klesá, ale v nejnižších patrech dolu se opět zvyšuje (je ale nižší než v okolí dolu) (Chowdhary, 1977 in Gautam & Patra, 2015). Měření ovšem byla prováděna pozemně přímo na patrech a nemusí tak odpovídat situaci ve vrstvě vzduchu dál od povrchu. Takovéto parametry větru sice nebyly v mé práci měřeny, ale poryvy větru se dají usuzovat z dodržování předepsané trasy vzducholodí, kde v prostoru dolu nebyly rozdíly významně patrné, v některých letech však při vzletu nad nulovou hladinou začala vzducholod' vybočovat. Výška startu vybočování ale nebyla jednotná, ani

míra vybočení, záleželo spíše na celkové rychlosti větru při daném letu (výrazné vybočování se dělo např. v letech 6 a 9 z 19.12.). Hranice mezi označením „vyšší a nižší“ patro dolu tedy bude záviset nejspíše na rychlosti větru nebo proměnlivosti jeho směru mezi západním a východním okrajem.

Toto se totiž může odrážet i od srovnání rychlostí větru mezi lety č. 6 a 7. Oba dva lety mají v podstatě jako jediné podobný dominantní směr vanutí u obou anemometrů, přičemž směr větru významně ovlivňuje koncentraci částic v různých částech dolu (Gautam & Patra, 2015). V tomto případě tedy předpokládám, že i v prostředí dolu bude vítr vanout tímto směrem. U letu č. 7 je dominantní skutečně jen jeden směr a je v obou anemometrech stejný, kdežto u letu č. 6 jsou směry rozloženy do více úhlů, které si u obou anemometrů úplně neodpovídají. Stále ale lze určit, že je dominantní proudění větru od JZ, což u jiných letů říci nelze. Z tohoto důvodu dle mého názoru nastává v letu č. 6 významný pokles částic Coarse ve výšce kolem 400 m n. m., kdežto u letu č. 7 přibližně již ve 230 m n. m. U obou letů je průměrná koncentrace v nižších vrstvách podobná, mezi 100 - 300  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , u letu č. 6 je více míst s vyšší koncentrací, což je ale rozdíl oproti ostatním letům, které většinou netvoří tak souvislý pás vyšší koncentrace.

Tato vyšší koncentrace by mohla být způsobena setrváváním částic v těchto výškách, a tím jejich postupnému zakoncentrování v čase, nebo jiným teplotním zvrstvením oproti ostatním letům, které však bohužel nebylo změřeno. Další možností je příspěvek hrubých částic z rypadel, která se nachází více na západ od trasy letu a mohla tak koncentraci nad nejnižší hladinou obohatit. U všech změn v koncentracích je však možné, že se jedná o obvyklý denní chod, který bohužel vzhledem k uskutečněným letům nemůže být příliš sledován. Denní chod koncentrací PM<sub>10</sub> a částečně i PM<sub>1</sub> v dole uvádí např. Grégr et al. (2011)

Různé směry větru i jeho rychlosti jsou patrné téměř u všech uskutečněných letů. Nelze tedy potvrdit předpoklad, že důl odvětrává jako jeden celek. Různé směry vanutí větru v rámci jednoho dolu ukazuje i Gautam & Patra (2015) nebo Grégr et al. (2011). Není tedy možné přisuzovat naměřeným povětrnostním podmínkám v odlehlých částech dolu nějaký konkrétní vliv na chování částic v prostoru dolu, jelikož nevíme, jakým způsobem se vítr chová zrovna v místě letu vzducholodi (s výjimkou letů č. 6 a 7 19.12., které mají větrné růžice podobné). Proto je v plánu na další podobná letecká měření umístit anemometr přímo na vzducholod'. Ve většině letů alespoň jeden z anemometrů překročil hranici bezvětrí, tedy 0,2  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  (ČMeS, 2018), i proto může být znalost proudění právě v místě odběru částic důležitá, abychom věděli, zda částice pochází spíše z nižších vrstev vzduchu nebo z okolí.

Vlivy větru mohou být lépe patrné v letech horizontálních. Pro horizontální lety byla vyřčena hypotéza, že technologie těžby v nižších patrech postupně vytvoří jednolitý emisní tok, který nebude na úrovni nulové hladiny rozeznatelný. Z většiny obrázků v kapitole 6.5 (Koncentrace atmosférického aerosolu a jeho distribuce uvnitř těžebního prostoru v horizontále) není zdroj (předpokládejme, že by jím mělo být rypadlo) patrný, až na let č. 5 z 19.12., kde se naopak vliv rypadel zdá být vysoce znatelný (oblak byl dokonce viditelný z odletového místa). Rýpadla jako významný zdroj částic detekuje např. Dočekalová (2015), ale vzhledem k nemožnosti rypadla detekovat v ostatních letech vyvstává otázka, jestli za touto zvýšenou koncentrací nestojí něco úplně jiného. Zvýšená je totiž koncentrace i ve frakci PM<sub>1</sub>, u které se maxima kolem rypadel nepředpokládala. Z tohoto letu ovšem neexistuje záznam, který by mohl pravděpodobný zdroj částic odhalit. Maxima koncentrací by se vzhledem k výšce letu nad terénem mohly nacházet na jiných místech než přímo v souřadnicích nad rypadlem, díky vanutí větru. Není ale jisté, zda oblaky skutečně pocházejí od rypadel. Z rozdílných hodnot anemometrů totiž nelze určit, kterým směrem mohly být částice odváty. Pokud se proudění v a nad důlní jámou rychle mění, může spíš dojít k rozfoukání shluků částic. V případě horizontálních letů může hrát roli také skutečnost, že větrná růžice je tvořena pro celý let, kdy však na jeho začátku, uprostřed nebo na konci mohlo být proudění zcela odlišné a na základě jeho znalosti bychom byli schopni říct, jestli zvýšená koncentrace v místě, kde se rypadlo nevyskytuje, je z důvodu přenosu částic z jiného rypadla. I proto bude vhodné umístit anemometr přímo na vzducholod', aby byla k dohledání data i o směru a intenzitě vanutí větru právě v potřebném okamžiku. Vzhledem k možnosti detekování částic z rypadel průletem nad nimi v hladině 285 m je třeba se ještě podívat, zda byly vůbec takovéto vertikální toky naměřeny ve vertikálních letech. V potaz jsou brány pouze lety, které začínaly na hladině 110 nebo 135 m, aby byl viditelný zdroj částic, přičemž žádný z těchto letů významný přímý vertikální tok z nejnižší hladiny až do nulové hladiny nevykazuje, což je v souladu i s měřením Grégra et al. (2011), kteří signifikantně vyšší hladinu PM<sub>10</sub> zaznamenali jen do výšky 60 m nad uhelnou slojí. Dočekalová (2015) ale naměřila emisní oblak hrubých částic nad rypadlem do výšky 150 m nad rypadlem, v mém případě dosahují oblaky výšky až 300 m n. m. (let č. 6 19.12.), což je výška nad rypadlem přibližně 200 m, ale nedá se s jistotou říct, jaký byl zdroj částic. Hypotéza č. 2 (kapitola 1 Úvod) ohledně jednotného emisního toku tedy nemůže být vyvrácena, jelikož let č. 5 19.12. se zdá emise hrubých částic z technologií v nižších patrech ukazovat, i když v případě rypadla K 111 není úvaha úplně vhodná, jelikož se nachází na vyšším patře, a proto by oblak jeho prachu mohl být lépe znatelný. Různým koncentracím PM<sub>1</sub> v nulové hladině nevěnuji takovou pozornost, jelikož toto není frakce dominující

v emisích z této těžby. Z horizontálního letu č. 2 11.12. pak ještě vychází, podobně jako z vertikálních letů, najevo výrazně nižší koncentrace Coarse v úseku odletěném v hladině nad třemi sty metry.

V grafech z přílohy 3 není příliš patrný rozptyl oblaku do stran se zvyšující se nadmořskou výškou. Při zpracování horních decilů ale bylo patrné, že v nižších vrstvách se 10% nejvyšších hodnot nachází ve vzorcích jdoucích za sebou a s rostoucí výškou bylo jejich rozmístění méně kompaktní. Pokud lety vykazovaly alespoň částečný exponenciální pokles, vyskytoval se právě do výšky okolo 300 m n. m. Grégr et al. (2011) také vysledoval pokles PM10 s nadmořskou výškou.

Ve vertikálních grafech (Příloha č. 3) nejsou v mnoha případech na první pohled patrné zvýšené koncentrace právě nad rýpadly. Např. v obou letech z 18.12. je patrná vyšší koncentrace hrubých částic nad rýpadlem K 83. Na trase letu se ale nachází ještě další rýpadla (K68 a K 102), od kterých žádný oblak patrný není. Naopak by od těchto rýpadel mohl pocházet oblak z grafů letů 2, 6 a 7 19.12. U letů 6 a 7 oblak koresponduje i se směrem větru, což se však u letu č. 2 říci nedá, jelikož se růžice výrazně liší. V letu č. 8 jsou zobrazena kromě K 83 i jiná rýpadla. Stále to vypadá, že od rýpadla K 83 žádný oblak nejde, nejde ani od rýpadla K 71, ale v blízkosti rýpadla K 108 se oblak nachází. Vyšší koncentrace se nad tímto rýpadlem nachází i v letu č. 3 z 18.12. Zvýšení je ale poměrně nevýrazné a nemuselo by tedy mít nutně příčinu v nějakém zdroji. Od ostatních rýpadel opět hrubé částice patrné nejsou. Pokud je v grafu patrný oblak alespoň nad jedním rýpadlem, nemělo by být příčinou absence ostatních oblaků jejich odvanutí větrem. Koncentrace z obou letů 18.12., které se uskutečnily večer, jsou nižší než lety z 19.12. v odpoledních hodinách. Ve večerních hodinách ale může docházet k nárůstu koncentrace částic PM10 (Gégr et al., 2011). Předpokládám tedy, že velkostroje nepracovaly.

Video z 6. letu 19.12. potvrzuje práci všech rýpadel vyobrazených v grafu. Nejvyšší koncentrace, které se nachází ve vzdálenosti přibližně 700 m ale nepochází z činnosti rýpadel, která jsou společně s vrtnými pracemi považována za hlavní zdroj částic (Ghose & Majee, 2000, 2001; Onder & Yigit, 2009), nýbrž z přítomnosti poháněcí stanice, která v tomto místě výrazně prášila, jak dokládá obr. 98.



Obr. 98 Poháněcí stanice obklopená prachem

V zákrytu rypadla K 83 se pak nacházely další dvě prášící poháněcí stanice, které ale nebyly umístěny přímo v trase letu a jejich oblak ale nebyl tak výrazný. Vliv poháněcí stanice by pak vysvětlil i koncentrace mezi  $1000 - 2000 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  v letu č. 2, které se nacházejí ve stejné vzdálenosti. Maximum je výraznější, jelikož vítr nejspíše nedosahoval takové intenzity. Grafy hmotnostní distribuce ukazují oprati ostatním hladinám a letům vyšší podíl částic, které jsou větší než  $10 \mu\text{m}$ .

Z vertikálních grafů je dále patrné, že zde není přítomný vliv rýpadel na koncentraci PM1. Koncentrace PM1 nedosahuje takového rozmezí v koncentraci jako částice PM10 a Coarse. V některých grafech zaujímá téměř celou plochu koncentrace  $10 - 20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , jindy je také patrný vertikální pokles, který je ovšem zpravidla pomalejší než u hrubých částic (Gautam & Patra, 2015). V letech, kde se nachází tato více méně jednolitá plocha, byla pozorována různě silná mlha, ač na datech z anemometrů se vlhkost vzduchu nijak razantně nemění (je ale také možné, že k nim již mlha nezasahovala). Mlha se tvoří na kondenzačních jádrech, které představují částice o velikosti  $10^{-8} - 10^{-5} \text{ m}$  (Bednář, 1985). Jelikož mají mlžné kapky poměrně nízkou hmotnost a k tvorbě mlhy dochází často za stabilního inverzního zvrstvení, setrvávají většinou mlhy na místě, kde došlo k jejich formaci (Skybová, 2007). Mlha většinou setrvá do doby, dokud se teplotní průběh opět nevyrovná na pokles s výškou (Bednář, 1985), což je dle obr. 1 (kapitola 2) v poledne, čemuž časově téměř odpovídá i situace z 19.12.

Z letů 18.12. a 20.12. byla pozorována mlha v prostoru dolu velmi silná (označení „velmi silná“ neodpovídá oficiální škále intenzity mlh, jelikož nebyla experimentálně zkoumána dohlednost). V letech č. 1 a 2 z 19.12. již mlha tak silná nebyla, v druhém letu byl ale pozorován oblak postupující od města Duchcov (na S) směrem do dolu, s následným klesavým pohybem. Situace byla zachycena na fotografii pořízené z odletového místa, ale je příliš nekvalitní, než aby jev mohl být rozeznatelný od okolní slabší mlhy. Vyšší koncentraci PM1 by také mohla způsobovat přilehlá tepelná elektrárna Ledvice (na V). Její

kouřová vlečka ovšem byla zachycena na videu a znatelně proráží inverzní vrstvu, která je na videu taktéž patrná, a okraj této inverzní vrstvy ve videu odpovídá hranici náhlého poklesu koncentrace částic v grafu. Inverzní vrstvu v těžební jámě dokládají i Pokorná et al. (2013). Předpokládám tedy, že u ostatních takto skokově se snižujících koncentrací je důvod stejný.



Obr. 99 Okraj inverzní vrstvy nad dolem a prorážející kouřová vlečka elektrárny Ledvice (v horní části obrázku se nachází okraj gondoly)

Jednotlivé zbarvení koncentrace PM1 se ze stejného důvodu vyskytuje i v horizontálních letech z 19.12. č. 4. a částečně 5 a homogenitu koncentrace PM1 zmiňuje i Gréger et al. (2011). U grafů vertikálních letů z 18. 12. č. 3 a 19.12. č. 1 však v určitých výškách dochází dokonce ke zvýšení koncentrace PM1. U grafu 19.12. je však v této hladině vyšší i koncentrace Coarse. Tento jev si vysvětluji již zmíněnou domněnkou, že stroje nepracovaly, a proto by mohly hrubé částice vystoupat výš, u země již nemít svůj zdroj a setrvat v této hladině inverzní vrstvy. Koncentraci PM1 navíc může zvyšovat zmiňovaný transport z okolí. Je možné, že k tomuto fenoménu docházelo i v letu č. 3 18.12., jelikož i zde se vyšší koncentrace PM1 nachází v severní části, ze které byl oblak sledován. Při tomto letu již ale byla tma.

Obce v okolí dolu jsou každý měsíc informovány o stavu ovzduší na jejich území, které by mohlo být ovlivněno činností dolu, Zprávou o měření prašnosti. Zpráva shrnuje kontinuální měření minutových koncentrací PM10 a může se stát základem pro provedení nápravných opatření negativ způsobených těžbou (Severočeské doly a.s., 2018c) Bohužel není možné srovnat i koncentraci PM1, kterou tyto zprávy neobsahují. Vybrané obce

Duchcov, Lom a Mariánské Radčice jsou zobrazeny na obr. 7 (kapitola Metodika – 5.1 Místo a čas).

Tab. 6 Koncentrace PM10 ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) na vybraných lokalitách (Duchcov, 2018; Lom, 2018; Mariánské Radčice, 2018)

	Duchcov	Lom	Mariánské Radčice
11.12.2017	35	32	47
18.12.2017	40	41	35
19.12.2017	58	38	37
20.12.2017	80	47	68
prosinec 2017, průměr	32	25	27
prosinec 2016, průměr	43	35	-
březen 2017, průměr	26	21	23
červenec 2017, průměr	19	18	16
říjen 2017, průměr	28	22	23

Data v tab. 6 jsou uvedena pro 4 letové dny, dále jako průměr celého měsíce prosince 2017 a průměr dalších měsíců. Z dat je patrné, že právě prosinec (jakožto zástupce zimních měsíců), má hodnoty nejvyšší. Průměr za měsíc prosinec 2017 je pro všechny obce vyšší než hodnoty v aglomeraci Praha, které se více než ze tří čtvrtin pohybovaly do koncentrace  $25 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  (ČHMÚ, 2018). Vzhledem k roku 2016 vykazoval rok 2017 nižší hodnoty. Mezi březnem a říjnem ani v jedné z obcí velký rozdíl není. Nejnižší hodnoty jsou pak v červenci. Obec Lom a Mariánské Radčice se nacházejí blízko sebe a jejich průměrné koncentrace jsou podobné. To se ale nedá říct o koncentracích z konkrétních dnů. Všechny obce vykazují nejvyšší hodnoty v poslední den měření – 20.12. Vzhledem k tomu, že byl v tento den proveden jen jeden let v dopoledních hodinách, nemá srovnávání velký smysl. V tomto letu nejsou patrné nejvyšší koncentrace PM10 ve srovnání s ostatními dny, je ale vysoká koncentrace PM1. 11.12. se průměrné koncentrace PM10 v hladině horizontálního letu 230 – 265 m pohybovaly kolem  $20 - 30 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 18.12. byly hodnoty obdobné, v některých částech lomu i nižší a 19.12. hodnoty z nulové hladiny dosahují i hodnot mezi 1 000 – 2 000  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  (patrně z horizontálního letu č. 5). Z vertikálních letů jsou ve výšce 285 m maximální hodnoty nad  $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . Dočekalová (2015) uvádí rozmezí koncentrací hrubých částic v nulové hladině dolu Vršany  $8 - 32 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , v části dolu kolem rypadel pak také kolem  $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . Ve dnech 11. a 18.12. se tedy důl nezdá zvyšovat koncentrace PM10 v obcích. Tyto hodnoty ani nepřekračují uzákoněný imisní limit, který je překročen pouze 20.12.



v Duchcově a Mariánských Radčicích a v Duchcově ještě 19.12. Různý příspěvek ke koncentraci PM10 v okolních obcích dokládá také např. Pokorná et al. (2016).

Zprávy o měření prašnosti uvádějí směr větru jen v případě Duchcova. Ve dnech 11. a 18. vane vítr ze severu, ale 19. a 20. přesně naopak, směrem z dolu Bílina na město. Vzhledem k vyšším koncentracím PM10 v Duchcově i v dole v tento den se zdá být vliv odnosu částic z dolu na povětrnostní podmínky v okolí zřejmý. Práce uvádějící souvislost mezi povrchovou těžební činností a vyšší koncentrací částic aerosolu v okolí dolu jsou již uvedeny v kapitole 1 Úvod. Stejně jako práce, které vliv na vyšší koncentraci nezjistily. Vyšší vliv se neprokázal např. u obcí v okolí dolu Vršany (Dočekalová, 2015).

Koncentrace zobrazené v práci bohužel nezahrnují celé dobývací území, jelikož akumulátory pohánějící vzducholoď a APS by tak dlouhý let nevydržely. Pakliže jsou částice z výšky přibližně 70 - 80 m n. m. (nejnižší patro 40 m n. m. + výška kola u rypadla) schopné vystoupat do výšky 110 m n. m. v koncentraci více než  $1\,000\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , můžou být z rypadel umístěných ve vyšších patrech dolu emise částic obdobné, a tyto částice by se tak snadno dostaly do okolí. Navíc mohou být obohaceny o částice z nižších pater, u kterých byl sledován postup po patrech směrem výš (Gautam & Patra, 2016). Bylo by proto vhodné změřit koncentrace částic a případně i jejich chování kolem těchto velkostrojů, které by za tohoto předpokladu mohly mít na okolí větší vliv než prostor proměřený v této práci.

Sama společnost Severočeské doly a.s. si je vědoma svých negativních vlivů na okolní prostředí, které těžbou způsobuje. Řeší zejména vodní režim (a ochranu vod), úrodnost odtěžené půdy a zacházení s ní, hluk, ovzduší a také ochranu druhů (Severočeské doly a. s., 2018c). V okolí obcí se budují např. ochranné valy, vysazují zelené protiprašné pásy. V prostoru dolu jsou pak zkrápěny a zakrývány pásové dopravníky a jejich přesypávače, nezpevněné důlní cesty a u ostatních komunikací je kladen vliv na jejich konstrukční bezprašnost (Severočeské doly a.s., 2018d). Snižování množství emisí z dolu není pouhým nákladem. Ghoose & Majee (2001) do svého výzkumu zapojili i cost-benefit analýzu peněžně kvantifikující náklady na snižování oproti přínosům, díky nimž se ušetří peníze, jako např. zdravotnictví, v němž by měly poklesnout výdaje za nemoci spojované se znečištěním způsobeným povrchovou těžbou, pokud se sníží emise z těžby.

## 8 Závěr

Povrchový důl Bílina je zdrojem hrubých částic aerosolu (aerodynamický průměr 1 – 10  $\mu\text{m}$ ), jejichž emise pochází hlavně z těžební činnosti. Průměrně hmotné částice v nejnižší hladině letu mají velikost (MMD) okolo 8  $\mu\text{m}$ . Chování těchto částic ve vertikálním a horizontálním směru bylo zobrazeno.

Vertikální pohyb částic závisí na meteorologických podmínkách (zejm. směr větru a srážky). Směrem do výšky hrubých částic (Coarse) ubývá. V některých případech se úbytek dá charakterizovat jako exponenciální, jedná se o úbytek i o 3 řády v rámci výstupu 550 m do výšky (pro frakce Coarse i PM10). Částice PM1 takto výrazný úbytek nezaznamenávají. V nejnižších výškách přesahuje koncentrace hrubých částic v blízkosti zdroje hodnoty až 1000  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , v místech bez zdroje je pak i do 10  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . Koncentrace hrubých částic v hladině hrany dolu dosahuje stejného rozmezí, v průměru se jedná ale o koncentrace daleko nižší.

Koncentrace zákonného imisního limitu PM10 50  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  poškozující lidské zdraví je v některých případech překročena i ve výšce 500 m n. m. (přibližně 460 m nade dnem těžební jámy), což by mohlo mít negativní vliv na ovzduší v okolních obcích. Příspěvek hrubých částic generovaných těžbou ke koncentraci PM10 v obcích v okolí dolu ale není jednoznačný a zdá se být také závislý na směru větru.

S výjimkou jednoho měření nebyly jednotlivé těžební velkostroje ve výškové hladině hrany dobývacího území rozeznatelné dle předpokládaného emisního toku. Oblak emisí se zdá být do výšky rozptýlován, a to i díky nestejným povětrnostním podmínkám, které v rámci těžební jámy panují. Hlavními zdroji emisí částic jsou kolesová rýpadla, nejvyšší koncentraci hrubých částic ovšem způsobila poháněcí stanice.

Pro lepší zmapování chování částic atmosférického aerosolu ve vrstvě vzduchu v dole by bylo zapotřebí vykonat delší měřicí kampaň (možnost zjištění případného denního chodu) a stejnou kampaň provést i v sušších měsících, kdy se charakteristiky aerosolu můžou výrazně lišit. Umístění anemometru v prostoru dolu by bylo vhodné změnit v umístění na vzducholod', aby byl patrný teplotní profil a větrné a vlhkostní charakteristiky přímo v trase letu. Letová měření by bylo dobré doplnit o pozemní měření na dně i v okolí dolu a pokusit se lety vzducholodi prodloužit na celou plochu dolu.

## 9 Seznam použité literatury

Anderson, J. O., Thundiyil, J. G., Stolbach, A. (2012). Clearing the Air: A Review of the Effects of Particulate Matter Air Pollution on Human Health. *Journal of Medical Toxicology* 8, s. 166–175

Aneja, V. P., Isherwood, A., Morgan, P. (2012). Characterization of particulate matter (PM<sub>10</sub>) related to surface coal mining operations in Appalachia. *Atmospheric Environment* 54, s. 496 – 501

Baron, P. A., Willeke, K., (2005). *Aerosol Measurement, Principles, Techniques, and Applications*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2005

Basslerová, B., (2017). Velikostně rozlišený atmosférický aerosol v pracovním prostředí povrchového hnědouhelného dolu. Diplomová práce. PřF UK, Praha, 2017

Bednář, J., (1985). *Vybrané kapitoly z meteorologie*. Univerzita Karlova v Praze, 1985

Bednář, J., Základní informace o atmosféře země. In: Braniš, M., Hůnová, I. (eds.) (2011). *Atmosféra a klima – Aktuální otázky ochrany ovzduší*. Univerzita Karlova v Praze, Karolinum. 2011

Braniš, M., Hůnová, I. (eds.) (2011). *Atmosféra a klima – Aktuální otázky ochrany ovzduší*. Univerzita Karlova v Praze, Karolinum. 2011

Civiš, M., (2010). Stanovení resuspendovatelné frakce ve vzorcích půd a pouličního prachu s využitím resuspenzní komory. Dizertační práce. PřF UK, Praha, 2010

Civiš, M., Hovorka, J., Thimmaiah, D., (2011). Stanovení velikostní distribuce částic resuspendovatelné složky vzorků z povrchového hnědouhelného dolu v resuspenzní komoře. *Hnědé uhlí* 1, s. 34–40

Cooper, C. D., Alley, F.C. (2014). Chapter 3: particulate matter. *Air pollution control—a design approach* (4th edition). Waveland Press Inc., Illinois, s. 126

ČHMÚ (2018). Kvalita ovzduší a rozptylové podmínky na území ČR, prosinec 2017.

ČMeS (2018). Meteorologický slovník výkladový a terminologický (eMS). Dostupný online 16.4.2018: <http://slovník.cmes.cz>

Dockery, D. W., Pope, C. A. (1994). Acute Respiratory Effects of Particulate Air Pollution. *Annual Review of Public Health* 15, s. 107 - 132

Dočekalová, V., (2015). Vertikální distribuce atmosférického aerosolu v mezní vrstvě atmosféry. Diplomová práce. PřF UK, Praha, 2015

Duchcov, (2018). Zprávy o měření prašnosti. Dostupné online 15. 6. 2018: <http://www.duchcov.cz/mereni-prasnosti/ds-1482>

Energetické fórum, (2018). APS – Aerodynamic Particle Sizer Spectrometer, TSI. Dostupné online 10.6.2018: <http://www.energetickeforum.cz/fsi-vut-v-brne/aerodynamic-particle-sizer-tsi-aps-3321>

Gautam, S., Patra, A. K. (2015). Dispersion of particulate matter generated at higher depths in opencast mines. *Environmental Technology & Innovation* 3, s. 11–2

Ghose, M. K., Majee, S. R. (2000). Assessment of dust generation due to opencast coalmining – an Indian case study. *Environmental Monitoring and Assessment* 67, s. 255–256.

Ghose, M. K., Majee, S. R. (2001). Air Pollution due to Opencast Coal Mining and It's Control in Indian Context. *Jurnal os Scientific & Industrial Research* 60, s. 786 – 797

Grégr M., Hovorka J. & Brejcha J. (2011). Denní a sezónní dynamika PM10 a PM1 ve spádnici svahu dolu Nástup Tušimice. *Hnědé uhlí* 4: 38–48

Hinds, C. W. (1999). *Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles*. Druhé vydání. New York, J. Wiley & Sons, 1999

Hovorka, J. (2011). Atmosférický aerosol. In: Braniš, M., Hůnová, I. (eds.) (2011). *Atmosféra a klima – Aktuální otázky ochrany ovzduší*. Univerzita Karlova v Praze, Karolinum. 2011

Huertas, I. J., Huertas, M. E., Izquierdo, S., Gonzáles, E. D. (2012a). Air quality impact assessment of multiple open pit coal mines in northern Colombia. *Journal of Environmental Management* 93, s. 121-129

Huertas, I. J., Huertas, M. E., Solís, D. A. (2012b). Characterization of airborne particles in open pit mining region. *Science of the Total Environment* 423, s. 39-47

Huertas, I. J., Huertas, M. E., Cervantes, G., Diaz, J. (2014). Assessment of the natural sources of particulate matter on the opencast mines air quality. *Science of the Total Environment* 493, s. 1047 - 1055

Chakraborty, M. K., Ahmad, M., Singh, R. S., Pal, D., Bandopadhyay, C., Chaulya, S. K. (2002). Determination of the emission rate from various opencast mining operations. *Environmental Modelling & Software* 17, s. 467 – 480

Chaulya, S. K. (2004). Assessment and management of air quality for an opencast coal mining area. *Journal of Environmental Management* 70, s. 1–14

Chowdhary, K. K. (1977). An experimental and theoretical investigation of turbulent separated reattached and redeveloped flows with transverse rectangular cavities. Ph.D.thesis, New Delhi, Indian Institute of Technology. Delhi, 1977.

Inyang, I. & Bae, S. (2006). Impacts of dust on environmental systems and human health, *Journal of Hazard Materials* 132, s. 5-6

Jones T., Blackmore P., Leach M., Bérubé K., Sexton K. & Richards R. (2002). Characterisation of airborne particles collected within and proximal to an opencast coalmine: South Wales, U.K. *Environmental Monitoring and Assessment* 75, s. 293–312

Kalvová, J., Mikšovský, J., Raindl, A. (2011): *Klima a jeho změny*. Braniš, M., Hůnová, I. (eds.) (2011). *Atmosféra a klima – Aktuální otázky ochrany ovzduší*. Univerzita Karlova v Praze, Karolinum. 2011

Li, X., Rohrer, F., Hofzumahaus, A., Brauers, T., Häseler, R., Bohn, B., Broch, S., Fuchs, H., Gomm, S., Holland, F., Jäger, J., Kaiser, J., Keutsch, F. N., Lohse, I., Lu, K., Tillmann, R., Wegener, R., Wolfe, G. M., Mentel, T. F., Kiendler-Scharr, A., Wahner, A. (2014). Missing Gas-Phase Source of HONO Inferred from Zeppelin Measurements in the Troposphere. *Science* 344, s. 292 - 296

Lom, (2018). Zprávy o měření prašnosti. Dostupné online 26. 7. 2018: <http://www.mesto-lom.cz/mesto/mereni-prachu-a-hluku-/?page=2>

Mariánské Radčice, (2018). Zprávy o měření prašnosti. Dostupné online 26. 7. 2018: <http://www.marianskeradcice.cz/index.php?oid=6010710>

Masters, G. M. (1998): Chapter 7: Air pollution. Introduction to environmental engineering and science (2nd edition). Prentice Hall of India, New Delhi, 392–405

Merefield, J., Stone, I., Jarman, P., Rees, G., Roberts, J., Jones, J., Dean, A. (1995). Environmental Dust Analysis in Opencast Mining Areas'. In: M. K. G. Whately and D. A. Spears (eds), *European Coal Geology*, Special Publication of the Geological Society of London 82, pp. 181–188.

Ministerstvo průmyslu a obchodu (2018a). Dostupné online 13.6.2018: <https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/statistika/elektrina-a-teplo/2017/10/Hrubavyroba-elektriny-2010-2016.pdf>

Ministerstvo průmyslu a obchodu (2018b). Dostupné online 13.6.2018: <https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/statistika/elektrina-a-teplo/2018/5/Zprava-o-vyvoji-energetiky-v-oblasti-tepla-za-rok-2016.pdf>

Onder, M., Yigit, E. (2009). Assessment of respirable dust exposures in an opencast coal mine. *Environmental Monitoring and Assessment* 152, s. 393 – 401

Pandey, B., Agrawal, M., Singh, S. (2014). Assessment of air pollution around coal mining area: Emphasizing on spatial distributions, seasonal variations and heavy metals, using cluster and principal component analysis. *Atmospheric Pollution Research* 5, s. 79-86

Patra, A. K., Gautam, S., Kumar, P (2016). Emissions and human health impact of particulate matter from surface mining operation - A review. *Environmental Technology & Innovation* 5, s. 233 – 249

Patra, A. K., Gautam, S., Majumdar, S., Kumar, P. (2016). Prediction of particulate matter concentration profile in an open cast copper mine in India using an artificial neural network model. *Air Quality Atmosphere and Health* 9, s. 697 – 711

Pless-Mulloli, T., Howel, D., King, A., Stone, I., Merefield, J., Bessell, J., Darnell, R. (2000). Living near opencast coal mining sites and children's respiratory health. *Occupational and Environmental Medicine* 57, s. 145–151

Pless-Mulloli, T., Howel, D., Prince, H. (2001). Prevalence of asthma and other respiratory symptoms in children living near and away from opencast coal mining sites. *International Journal of Epidemiology* 30(3), s. 556–563

Pokorná, P., Hovorka, J., Kroužek, J., Hopke, P. K. (2013). Particulate matter source apportionment in a village situated in industrial region of Central Europe. *Journal of the Air & Waste Management Association* 63, s. 1412 – 1421

Pokorná, P., Hovorka, J., Brejcha, J. (2016). Impact of Mining Activities on the Air Quality in The Village Nearby a Coal Strip Mine. *Earth and Environmental Science* 44, s. 1 - 5

Pope, C. A. & Dockery, D. W. (2006). Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect. *Journal of the Air & Waste Management Association* 56, s. 709–742

Prakash, B. B., Kecojevic, V., Lashgari, A. (2016). Analysis of dust emission at train loading facility. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment* 32, s. 56-74

Quintana, C., Bellefqih, S., Laval, J.Y., Guerquin-Kern, J.L., Wu, T.D., Avila, J., Ferrer, I., Arranz, R., Patino, C., (2006). Study of the localization of iron, ferritin, and hemosiderin in Alzheimer's disease hippocampus by analytical microscopy at the subcellular level. *Journal of Structural Biology* 153(1), s. 42–54

Reddy, S. G., Ruj B. (2003). Ambient air quality status in Raniganj-Asansol area, India. *Environmental. Monitoring and Assessment* 89, s. 153–163

Sbírka zákonů České republiky. Vyhláška 373/2009 kterou se mění vyhláška č. 553/2002 Sb., kterou se stanoví hodnoty zvláštních imisních limitů znečišťujících látek, ústřední regulační řád a způsob jeho provozování včetně seznamu stacionárních zdrojů podléhajících regulaci, zásady pro vypracování a provozování krajských a místních regulačních řádů a způsob a rozsah zpřístupňování informací o úrovni znečištění ovzduší veřejnosti, ve znění vyhlášky č. 42/2005 Sb.

Sbírka zákonů České republiky. Vyhláška 415/2012 o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší ve znění vyhlášky č. 155/2014 Sb., vyhlášky č. 155/2014 Sb. (část), vyhlášky č. 406/2015 Sb., vyhlášky č. 171/2016 Sb. a vyhlášky č. 452/2017 Sb.

Sbírka zákonů České republiky. Zákon o ochraně ovzduší 201/2012 ve znění zákona č. 64/2014 Sb., zákona č. 87/2014 Sb., zákona č. 382/2015 Sb., zákona č. 369/2016 Sb., zákona č. 369/2016 Sb., zákona č. 183/2017 Sb. a zákona č. 225/2017 Sb.

Seinfeld, J. H. & Pandis, S. N., (2006). *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. John Wiley and Sons, 2006

Severočeské doly a.s., (2018b). Prezentace Severočeské doly a.s. Dostupné online 14.6.2018: <http://www.sdas.cz/prezentace-sdas/start.html#chranime>

Severočeské doly a.s., (2018c). Těžba uhlí a její vliv na životní prostředí. Dostupné online 14.6.2018: <http://www.sdas.cz/aktivita/zivotni-prostredi/tezba-uhli-a-její-vliv-na-zivotni-prostredi.aspx>

Severočeské doly a.s., (2018d). Ochrana ovzduší. Dostupné online 14.6.2018: <http://www.sdas.cz/aktivita/zivotni-prostredi/ochrana-ovzdusi.aspx>

Skybová, M., (2007). Studium transportu a transformací troposférických polutantů. Dizertační práce PřF MUNI, Brno 2007

Tartakovsky, D., Stern, E., Broday, D. M. (2016). Dispersion of TSP and PM10 emissions from quarries in complex terrain. *Science of the Total Environment* 542, s. 946-954

Triantafyllou a. G., Zoras S. & Evagelopoulos V. (2006). Particulate matter over a seven year period in urban and rural areas within, proximal and far from mining and power station operations in Greece. *Environmental Monitoring and Assessment* 122, s. 41–60

Trivedi, R., Chakraborty, M. K., Tewary, B. K. (2009). Dust dispersion modeling using fugitive dust model at an opencast coal project of Western Coalfields Limited, India. *Journal of Scientific and Industrial Research* 68, s. 71–78

US EPA, 2018 NAAQS Table. Dostupné online, 3.8.2018: <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table>